



**MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİNDE KISIT PROGRAMLAMA
VE KUYRUK AĞLARI YAKLAŞIMLARI**

Mehmet PINARBAŞI

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2015

MEHMET PINARBAŞI tarafından hazırlanan “MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİNDE KISIT PROGRAMLAMA VE KUYRUK AĞLARI YAKLAŞIMLARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Bilal TOKLU

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

İkinci Danışman: Doç. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI

İşletme, Melikşah Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Serpil EROL

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Burak BİRGÖREN

Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Süleyman ERSÖZ

Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Uğur ÖZCAN

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Talip KELLEGÖZ

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/11/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet PINARBAŞI

27.11.2015

MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİNDE KISIT PROGRAMLAMA VE KUYRUK AĞLARI YAKLAŞIMLARI

(Doktora Tezi)

Mehmet PINARBAŞI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2015

ÖZET

Bu tez çalışmasında, deterministik ve stokastik montaj hattı dengeleme problemleri için yeni çözüm önerileri sunulmuştur. Deterministik hatlarda görev süreleri belirli sabitler olarak ifade edilirken stokastik hatlarda görev süreleri belirli bir olasılık dağılımı ile ifade edilirler. Tez çalışmasında ilk olarak, özellikle Tip-2 problemlerinde ortaya çıkan atama kısıtlarını da dikkate alan bir kısıt programlama modeli önerilmiş ve model çözülmüştür. Bu modelde amaç fonksiyonu verilen bir istasyon sayısı ile çevrim zamanının en küçüklenmesidir. İkinci olarak montaj hatlarında ortaya çıkan değişkenlik ele alınmıştır. Stokastik montaj hattı dengeleme problemi için doğrusal olmayan yeni bir model önerilmiştir. Önerilen modelde görev süresi değişkenliğinin yanı sıra istasyonlara iş parçalarının geliş süreci ve istasyonlardan çıkış süreci değişkenliği de dikkate alınmıştır. Bu hatların performans değerlendirmesinde kuyruk modellerinin uygulanabilirliği teorik önermelerle kanıtlanmış ve açık kuyruk ağlarına dayalı yeni bir model önerilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu istasyon kullanım oranlarını eşitlemek için kullanılan düzgünlük indeksinin en küçüklenmesidir. Önerilen modelin çözümü için iki aşamalı bir çözüm prosedürü geliştirilmiştir. Prosedürün ilk aşamasında kısıt programlama kullanılarak montaj hattı için uygun hat tasarımı alternatifleri üretilirken ikinci aşamasında bu uygun hat tasarımları için kuyruk ağları kullanılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Hat performansı çeşitli sistem parametrelerinin değişimi ile değerlendirilmiş ve çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur. Üçüncü olarak, özellikle büyük boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmak üzere ayrıştırma metoduna dayalı yeni bir stokastik model önerilmiştir. Amaç fonksiyonu hattaki toplam ortalama iş sayısının en küçüklenmesidir. Modelin çözümü için kısıt programlama ve kuyruk ağlarının entegre edildiği bir yaklaşım kullanılmış ve model çözümleri simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen modelin etkinliği test problemleri üzerinde incelenmiştir. Hat performansının ve dengesinin değişkenlikten nasıl etkilendiği istasyon iş yükü, bekleme süresi ve toplam ortalama iş sayısı açısından tartışılmıştır. Kısıt programlanın montaj hattı dengelemede etkin bir alternatif modelleme tekniği olduğu aynı zamanda stokastik montaj hattı dengeleme problemleri için kuyruk ağı yaklaşımlarının performans değerlendirmede etkin yaklaşımlar olduğu gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 906.1.141

Anahtar Kelimeler : Montaj hattı dengeleme, değişkenlik, kuyruk ağları, kısıt programlama, difüzyon yaklaşımı, ayrıştırma metodu

Sayfa Adedi : 149

Danışman : Prof. Dr. Bilal TOKLU

İkinci Danışman : Doç. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI

CONSTRAINT PROGRAMING AND QUEUEING NETWORKS APPROACHES ON THE BALANCING OF ASSEMBLY LINES

(Ph. D. Thesis)

Mehmet PINARBAŞI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2015

ABSTRACT

In this study, new solution approaches for deterministic and stochastic assembly line balancing problems are presented. Stochastic assembly lines have task times distributed by certain probability functions while the task times are certain constants in deterministic lines. In this thesis, firstly, a constraint programming model is proposed for balancing problem with assignment restrictions which arise from type-2 problem. The objective function of the model is to minimize the cycle time for a given number of stations. Secondly, variation in the assembly line is studied. A new non-linear model is proposed for stochastic assembly line balancing problem. Arrival and departure processes variations are considered together in the proposed model aside from the task time variation. Applicability of queueing networks in performance evaluation of the stochastic assembly line is proven with theoretical propositions. A stochastic optimization model for balancing an assembly line is proposed based on the open queueing networks. Objective function of the model is smoothness index in order to equalize the station utilizations. A two-stage solution procedure is developed to solve the model. In the first stage of the procedure, feasible task assignments are generated using constraint programming, and performance evaluation is performed via open queueing network approach in the second stage. Line performances are evaluated with changing several parameters and some remarks are reported with regard to these evaluations. Third, a decomposition based model is proposed for solving especially large size problems. Total mean number of jobs in the line is the objective function in this model. Integrated constraint programming and queueing network approach is used to solve the model and the solutions are compared with simulation results. The effectiveness of the proposed model is established on the test problems. How the line performance and balance are affected by changing the variation is discussed in terms of the station workload, waiting time and total mean number of jobs in the line. It is shown that not only constraint programming is an efficient alternative modeling technique for solving assembly balancing problems, but also queueing network approaches are efficient method in the performance evaluation of the stochastic assembly lines.

Science Code : 906.1.141

Key Words : Assembly line balancing, variability, queueing networks, constraint programming, diffusion approximation, decomposition method

Page Number : 149

Supervisor : Prof. Dr. Bilal TOKLU

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca tüm bilgi birikimleri ile yanımda olup kıymetli zamanlarını ayırarak her türlü desteklerini esirgemeyen ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman Hocalarım Sayın Prof. Dr. Bilal TOKLU ve Doç. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI'ya, değerli zamanlarını ayırarak kıymetli bilgi ve tecrübelerinden faydalanmama imkân veren tez izleme komitesi üyeleri “Kırıkkale Üniversitesi'nden” Sayın Prof. Dr. Burak BİRGÖREN ve “Gazi Üniversitesi'nden” Prof. Dr. Serpil EROL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Araştırmam süresince büyük fedakârlıklarla bana her türlü konuda desteklerini esirgemeyen “Kırıkkale Üniversitesi'nden” Arş. Gör. Hacı Mehmet ALAĞAŞ ve “Karabük Üniversitesi'nden” Arş. Gör. Dr. Çağrı SEL'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca Hitit Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde görev yapan tüm mesai arkadaşlarıma gösterdikleri yakın ilgi ve destekten dolayı teşekkür ederim.

Tüm eğitimim için her türlü fedakârlığı gösteren, maddi ve manevi hiçbir destekten kaçınmayan çok kıymetli aileme, tez çalışmamın ikinci yarısında hayatıma girerek bana koşulsuz sevgisini esirgemeyen ve her manada yardımcı olan eşime ve varlığı ile beni motive eden oğluma sonsuz teşekkür ederim. Bu tez çalışması kıymetli Annem, Babam, Eşim ve Oğluma armağan olsun.

Bu tez çalışmasına maddi katkılarından dolayı TÜBİTAK-BİDEB Programına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL KAVRAMLAR VE YÖNTEMLER	7
2.1. Montaj Hatları ve Montaj Hattı Dengeleme Problemi	7
2.1.1. Montaj hatlarında temel kavramlar.....	7
2.1.2. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması	10
2.2. Kuyruk Ağları	12
2.2.1. Kuyruk ağlarında temel kavramlar	14
2.2.2. Kuyruk ağlarının sınıflandırılması.....	14
2.3. Kısıt Programlama.....	17
2.3.1. Kısıt problemleri.....	19
2.3.2. Karışık tamsayılı programlama ve kısıt programlama karşılaştırması ...	22
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	25
3.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri	25
3.1.1. Deterministik montaj hattı dengeleme problemleri	26
3.1.2. Stokastik montaj hattı dengeleme problemleri	31
3.2. Kuyruk Ağları	38

	Sayfa
3.3. Kısıt Programlama.....	46
4. MONTAJ HATTI Dengeleme Problemi İÇİN BİR KISIT PROGRAMLAMA MODELİ.....	51
4.1. Montaj Hattı Dengelemede Atama Kısıtları.....	51
4.2. Matematiksel Model.....	54
4.3. Önerilen Kısıt Programlama Modeli	55
4.4. Sayısal Sonuçlar	60
4.4.1. Durum 1 sonuçları	62
4.4.2. Durum 2 sonuçları	62
4.4.3. Durum 3 sonuçları	64
4.5. Tartışma ve Sonuç	65
5. STOKASTİK MONTAJ HATTI Dengelemede DEĞİŞKENLİĞİN MODELLENMESİ	67
5.1. Montaj Hatlarında Değişkenlik	67
5.2. Değişkenliğin Tanımlanması.....	68
5.3. Kuyruk Ağları ile Montaj Hattı Dengeleme Arasındaki Teorik İlişki	70
5.4. Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Önerilen Model	74
5.5. Önerilen Çözüm Prosedürü	76
5.5.1. Kısıt programlama modeli	77
5.5.2. Performans değerlendirme modeli.....	78
5.5.3. Çözüm prosedürü.....	80
5.6. Sayısal Sonuçlar	82
5.6.1. Açıklayıcı örnek.....	82
5.6.2. Deney tasarımı ve sonuçlar.....	85
5.6.3. Tartışma ve çıkarımlar	90
5.7. Montaj Hatlarında Çanak Etkisi.....	94
5.7.1. Görev zamanı değişkenliğinin etkisi	95

	Sayfa
5.7.2. Çanak etkisinin tartışılması.....	98
6. STOKASTİK MONTAJ HATTI DENGELEME İÇİN BİR AYRIŞTIRMA MODELİ	101
6.1. Ayrıştırma Metodu	102
6.2. Önerilen Stokastik Model.....	107
6.3. Çözüm Metodu.....	109
6.4. Deneysel Analizler	112
6.4.1. Sayısal sonuçlar	112
6.4.2. Hesaplama zamanı analizi	119
6.5. Tartışma ve Çıkarımlar.....	120
6.5.1. İstasyon iş yükü analizi.....	121
6.5.2. Bekleme süresi analizi	126
6.5.3. WIP analizi	127
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	131
7.1. Sonuç.....	131
7.2. İleri Çalışma Önerileri.....	133
KAYNAKLAR	135
ÖZGEÇMİŞ	147

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. MHDP için temel kavramlar.....	8
Çizelge 2.2. Kuyruk ağları için temel kavramlar.....	15
Çizelge 3.1. Deterministik MHDP literatür çalışmaları.....	27
Çizelge 3.2. Stokastik MHDP literatür çalışmaları.....	32
Çizelge 3.3. Montaj hatları ve montaj sistemleri konusunda yapılan kuyruk ağları çalışmaları.....	39
Çizelge 3.4. Kuyruk ağlarının optimizasyon problemleri uygulamala.....	43
Çizelge 3.5. Kuyruk ağlarının MHDP uygulamaları.....	45
Çizelge 4.1. AKMHDP için literatür araştırması.....	53
Çizelge 4.2. Uyumlu ve uyumsuz kısıtların listesi.....	60
Çizelge 4.3. İstasyon ve uzaklık kısıtları listesi.....	61
Çizelge 4.4. Durum 1 için test sonuçları.....	63
Çizelge 4.5. Durum 2 için test sonuçları.....	63
Çizelge 4.6. Durum 3 için test sonuçları.....	64
Çizelge 4.7. Atama kısıtları olmaksızın MHDP için KTP ve KP modellerinin karşılaştırılması.....	65
Çizelge 4.8. Geliştirilen modellerin hesaplama zamanı açısından üstün oldukları örnek sayıları.....	66
Çizelge 5.1. Merten problemi için görev parametreleri ($cv = 0,8$).....	83
Çizelge 5.2. Sayısal deney parametreleri.....	86
Çizelge 5.3. 7 görevli Merten problemi için sayısal sonuçlar.....	86
Çizelge 5.4. 9 görevli Jaeschke problemi için sayısal sonuçlar.....	88
Çizelge 5.5. 11 görevli Jackson problemi için sayısal sonuçlar.....	89
Çizelge 5.6. 21 görevli Mitchell problemi için sayısal sonuçlar.....	90

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.7. Mitchell üç istasyonlu problem için farklı cv değerleri için optimal görev atamaları ($1/\lambda = 37, cv_A^2 = 0,8$)	91
Çizelge 5.8. Jaeschke problemi için test sonuçları ($cv_A^2 = 0,5$)	96
Çizelge 5.9. Jackson problemi için test sonuçları ($cv_A^2 = 0,5$)	97
Çizelge 5.10. Mitchell problemi için test sonuçları ($cv_A^2 = 0,5$)	97
Çizelge 6.1. Sawyer 30 görev 7 istasyon test problemi sonuçları.....	114
Çizelge 6.2. Sawyer 30 görev 10 istasyon test problemi sonuçları.....	115
Çizelge 6.3. Kilbridge 45 görev 4 istasyon test problemi sonuçları.....	115
Çizelge 6.4. Kilbridge 45 görev 10 istasyon test problemi sonuçları.....	116
Çizelge 6.5. Warnecke 58 görev 6 istasyon test problemi sonuçları.....	116
Çizelge 6.6. Warnecke 58 görev 10 istasyon test problemi sonuçları.....	117
Çizelge 6.7. Wee-Mag 75 görev 5 istasyon test problemi sonuçları.....	117
Çizelge 6.8. Wee-Mag 75 görev 10 istasyon test problemi sonuçları.....	118
Çizelge 6.9. Mukherje 94 görev 6 istasyon test problemi sonuçları.....	118
Çizelge 6.10. Mukherje 94 görev 9 istasyon test problemi sonuçları.....	119

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Örnek bir montaj hattı tasarımı.....	8
Şekil 2.2. MHDP'nin sınıflandırma diyagramı.....	10
Şekil 2.3. Tipik bir kuyruk süreci modeli.....	13
Şekil 2.4. Kuyruk ağları (a) Açık (b) Kapalı.....	15
Şekil 2.5. Kuyruk ağı topolojileri (a) Tandem (Sıralı) (b) Ayrışan (c) Birleşen.....	17
Şekil 2.6. Genel kısıt programlama çözüm algoritması (Kanet ve diğerleri, 2004).....	18
Şekil 3.1. Tez çalışmasında dikkate alınan problemler.....	48
Şekil 5.1. Montaj hatları ve kuyruk ağları arasındaki kavramsal çerçeve.....	74
Şekil 5.2. Önerilen çözüm prosedürü.....	77
Şekil 5.3. Merten problemi için görev zamanları, görevlerin standart sapmaları ve öncelik ilişkileri.....	82
Şekil 5.4. Merten problemi için ortalama istasyon kullanım oranları karşılaştırması....	83
Şekil 5.5. Merten problemi için ortalama ürün sayısı karşılaştırması.....	84
Şekil 5.6. Merten problemi için düzgünlük indeksleri karşılaştırması.....	85
Şekil 5.7. Mitchell 3 istasyon için değişkenliklerin karşılaştırılması ($1/\lambda = 36$).....	92
Şekil 5.8. Jackson 3 istasyonlu problemi için farklı talepler arası zaman için ortalama ürün sayısı ve kullanım oranları ($cv_A^2 = 0,5, cv = 0,8$).....	93
Şekil 5.9. Farklı cv ve $1/\lambda$ değerleri ile en iyi atamaların ortalama ürün sayısı kıyaslaması.....	94
Şekil 5.10. Tipik bir çanak etkisi.....	95
Şekil 5.11. İstasyon kullanım oranlarında çanak etkisi.....	98
Şekil 5.12. Ortalama ürün sayısında çanak etkisi.....	98
Şekil 6.1. İstasyonlar arası değişkenliğin etkisi.....	103
Şekil 6.2. Hesaplama zamanı analizi sonuçları a) 100 saniye b) 1 300 saniye c) 15 000 saniye.....	120

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Kilbridge 10 istasyon test problemi için istasyon iş yükleri $\left(1/\lambda = 69, cv_A^2 = 0,2\right)$	121
Şekil 6.4. Kilbridge 10 istasyon test problemi için istasyon iş yükleri $\left(1/\lambda = 69, cv_A^2 = 0,8\right)$	123
Şekil 6.5. Wee-Mag 5 istasyon test problemi için istasyon iş yükleri $\left(1/\lambda = 375, cv_A^2 = 0,2\right)$	123
Şekil 6.6. Wee-Mag 5 istasyon test problemi için istasyon iş yükleri $\left(1/\lambda = 375, cv_A^2 = 0,8\right)$	124
Şekil 6.7. Kilbridge 10 istasyon test problemi için bekleme süreleri $\left(1/\lambda = 69, cv_A^2 = 0,8\right)$	127
Şekil 6.8. Kilbridge 10 istasyon test problemi için WIP miktarı.....	128
Şekil 6.9. Wee-Mag 5 istasyon test problemi için WIP miktarı.....	128

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
i	Görev $i \in T$
j, k	İstasyon/Düğüm $j, k \in W$
x_{ik}	1, görev i istasyon k 'ya atanmışsa; 0, aksi halde.
$\dot{I}stasyonNumarası[Görev_i]$	Görev i 'nin atandığı istasyon numarası
T	Görev kümesi; $T = (1, 2, \dots, \ T\)$
$\ T\ $	Görev kümesi T 'deki eleman sayısı
W	İstasyon kümesi; $W = (1, 2, \dots, \ W\)$
$\ W\ $	İstasyon kümesi W 'deki eleman sayısı
d_{ij}^-	Görev i ve j arasındaki minimum istasyon uzaklığı
d_{ij}^+	Görev i ve j arasındaki maksimum istasyon uzaklığı
cv	Değişkenlik katsayısı
t_i	Görev i 'nin operasyon zamanı
μ_i^t	Görev i 'nin operasyon zamanı ortalaması
σ_i^t	Görev i 'nin operasyon zamanı standart sapması
$t(S_k)$	İstasyon k 'nın iş yükü
S_k	İstasyon k 'ya atanan görevler kümesi
μ_k^s	İstasyon k 'nın iş yükü ortalaması
σ_k^s	İstasyon k 'nın iş yükü standart sapması
cv_k^s	İstasyon k 'nın değişkenlik katsayısı
c	Çevrim zamanı
ct	Teorik çevrim zamanı

Simgeler**Açıklamalar**

E_i	Görev i 'nin atanabileceği en erken istasyon
L_i	Görev i 'nin atanabileceği en geç istasyon
P_i^*	Görev i 'nin tüm öncüller kümesi
F_i^*	Görev i 'nin tüm ardılları kümesi
Pr	Görevler arasındaki öncelik ilişkileri kümesi; $Pr = \{(i,h), \dots, (p,r)\}$
IT	Uyumsuz görev çiftleri kümesi; $IT = \{(i,h), \dots, (p,r)\}$
LT	Uyumlu görev çiftleri kümesi; $LT = \{(i,h), \dots, (p,r)\}$
LD	Aralarında minimum uzaklık olan görev çiftleri; $LD = \{(i,h), \dots, (p,r)\}$
UD	Aralarında maksimum uzaklık olan görev çiftleri; $UD = \{(i,h), \dots, (p,r)\}$
A	Kısıt programlamada uygun bir görev atama kombinasyonu
$D(x_i)$	x_i karar değişkeninin çözüm kümesi
C_j	Kısıt programlama modelindeki j 'inci kısıt
v_i	i karar değişkeninin aldığı çözüm değeri
$var(C_j)$	Kısıt C_j 'de yer alan karar değişkenleri (var) kümesi
SC_j	C_j kısıtında yer alan karar değişkenleri
θ	Hat çıktı hızı
ρ_k	İstasyon k 'nın kullanım oranı
$\bar{\rho}$	Hattın ortalama kullanım oranı
t_i	Trafik yoğunluğu
μ_A	Gelişler arası oran
λ	Gelişler arası veya talepler arası oran
e_k	İstasyon k 'nın ziyaret oranı

Simgeler**Açıklamalar**

cv_{Ak}^2	İstasyon k 'nın gelişler arası zaman değişkenlik katsayısının karesi
cv_{Ek}^2	İstasyon k 'nın işlem zamanı değişkenlik katsayısı karesi $cv_{Ek}^2 = (cv_k^s)^2 \quad \forall k \in W$
p_{jk}	İstasyon j ve k arasındaki rota olasılığı
$\hat{\rho}_k$	İstasyon k 'nın güncellenmiş kullanım oranı
$\bar{K}_k$	İstasyon k 'daki ortalama iş sayısı
m	İstasyon sayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AKMHDP	Atama Kısıtlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi
DG	Denge Gecikmesi
DI	Düzgünlük İndeksi
HE	Hat Etkinliği
İY	İş Yüğü Dağılımı
KA	Kuyruk Ağları
KOP	Kısıt Optimizasyonu Problemleri
KP	Kısıt Programlama
KSP	Kısıt Sağlama Problemleri
KTP	Karışık Tamsayılı Programlama
MHD	Montaj Hattı Dengeleme
MHDP	Montaj Hattı Dengeleme Problemi
MLY	Maliyet
SMHDP	Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi
ÜO	Üretim Oranı
WIP	Hattaki Ortalama İş Sayısı/Yarı Mamul Stoku

1. GİRİŞ

Üretim sistemleri sanayi devriminden günümüze kadar sürekli bir gelişim içerisinde olmuştur. Bu gelişimin nedenleri arasında gelişen teknoloji, müşteri taleplerindeki artış, ürün çeşitliliğindeki artış gibi nedenler ve işletmelerin pazar ve rekabet avantajlarını koruma amacı sayılabilir. İşletmeler ayakta kalabilmek için yüksek kalitede ve miktarlardaki ürünleri düşük maliyetlerde üretmeye zorlanmıştır. Bu nedenle işletmeler üretim sistemlerinde meydana gelen birçok problem ile karşı karşıya kalmışlardır. Papadopolous, Heavey ve Browne (1993: 8-12) bu üretim problemlerini aşağıdaki gibi;

- i. Montaj hattı dengeleme problemi
- ii. Bekleme yeri kapasitesi (Buffer) atama problemi
- iii. Sıralama ve çizelgeleme problemi
- iv. Performans analizi, olarak sınıflandırmışlardır.

Bu problemlerden montaj hattı dengeleme problemi montaj hatlarında karşılaşılan en temel problemidir. Montaj hatları rekabetçi küresel piyasa şartlarında müşteri taleplerine daha hızlı, etkin ve kaliteli cevap verilebilmesi için ortaya çıkmış akış tipi bir üretim sistemidir. Montaj hatlarında bu piyasa şartlarını karşılayabilmek için belirli kısıtlar altında bir veya birkaç amacı en iyileyecek şekilde görevlerin istasyonlara atanması gerekmektedir. Bu görev atama problemine üretimde montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) denir. İşletmenin kuruluşu ile gerçekleştirilen hat denge performansının zaman içinde değişen pazar ve üretim şartlarına bağlı olarak sürekli bir şekilde analizi, hat etkinliğinin sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Sürekli gelişen teknoloji, müşteri talep yapısının değişmesi ve sistem parametrelerinde ortaya çıkacak değişken yapı nedeniyle montaj hatlarının tasarımı problemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bu durumlar hatta çeşitli üretim kısıtlarının da ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Geleneksel MHDP’de görev sürelerinin deterministik süreler olduğu varsayılır. Ancak gerçek hayatta makine bozulmaları, operatörün motivasyon ve bilgi eksikliği, karmaşık iş yapıları, eğitim eksikliği gibi nedenlerden dolayı görev süreleri kesin olarak bilinmemektedir. Bu durum hatta stokastik faktörlerin ortaya çıkmasına neden olacaktır. Stokastik faktörler görev süreleri için söz konusu iken gelen müşteri talepleri için de söz konusu olabilmektedir. Montaj hatları ile ilgili çalışmalarda müşteri taleplerinden doğan yarı ürün veya hammaddelerin hatta geliş zaman aralıkları sabit olan çevrim zamanına

eşittir. Yani hatta gelen iki ayrı hammadde/yarı ürün gelişleri arasındaki zaman çevrim zamanına eşittir. Stokastik yapıya sahip bir montaj hattında bu çevrimin sabit sürelerde olması beklenmez (Buzacott ve Shanthikumar, 1993). Geleneksel montaj hattı dengeleme (MHD) yöntemlerinde hatta ürün gelişleri arasındaki zamanın stokastik olduğu durum dikkate alınmamıştır. Ayrıca montaj hatları birbirine sıralı bağlı istasyonlardan oluştuğu için bir istasyonun çıktısı sonraki istasyon için girdi olarak değerlendirilir. Deterministik ortamda iki istasyon arasındaki bu girdi-çıkış süresi ve ürün miktarı sabit iken, stokastik ortamda değişkenlik göstermektedir.

Geleneksel MHD probleminin çözümü için birçok teknik ve yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemleri genel olarak kesin ve sezgisel yöntemler olarak sınıflandırmak mümkündür. Matematiksel programlama, dal-sınır algoritması ve dinamik programlama kesin yöntemlere örnek olarak verilebilecek iken probleme özgü sezgiseller ve meta-sezgisel yöntemler ise sezgisel yöntemlere örnek verilebilir. Özellikle büyük boyutlu ve gerçek hayat problemlerinde MHDP'nin NP-zor yapıda (Wee ve Magazine, 1986) olması nedeniyle tüm uygun alternatif çözümlerin kesin yöntemler ile elde edilmesi mümkün olamamaktadır. Sezgisel yöntemler ise daha kısa sürede kabul edilebilir çözümlerin üretilmesine olanak sağlamaktadır (Battaia ve Dolgui, 2013). Literatür incelendiğinde bu yöntemler dışında daha yenilikçi yöntemlerin (kısıt programlama gibi) henüz çok az sayıda ele alındığı görülmektedir (Topaloğlu, Salum ve Supçiller, 2012).

Tez çalışmasında MHDP için uygulaması henüz yeni olan kısıt programlama (KP) yaklaşımı kullanılmıştır. KP sıralama (Siala, Hebrard ve Huguet, 2015), çizelgeleme (Zeballos, 2010), karesel atama (Domes ve Neumaier, 2010), gezgin satıcı (Pesant, Gendreau, Potvin ve Rousseau, 1998) gibi birçok kombinatoriyal problemin çözümünde etkin olarak kullanılan bir programlama metodudur. KP'nin en büyük avantajı esnek bir yapıda doğrusal, doğrusal olmayan veya mantıksal tüm kısıtların kolaylıkla ifade edilmesine imkân vermesidir. Çok az sayıda çalışmada MHDP'nin çözümü için KP'nin kullanıldığı görülmüştür. Çalışmada öncelikle KP'nin deterministik MHDP'ye uygulanabilirliği araştırılmış ve oldukça zor atama kısıtlı MHDP'ye uygulanarak yüksek performans gösterdiği karışık tamsayılı programlama ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Daha sonra stokastik MHDP için KP'nin performans analiz yöntemleri ile entegre çalıştığı etkin algoritma ve modeller geliştirilmiştir.

Değişkenliğin söz konusu olduğu üretim sistemlerinin performans analizi yöntemleri ise simülasyon ve analitik olarak ikiye ayrılmıştır. Simülasyon sistem modellemede açık ve esnek bir yöntem olsa da çalışma zamanı uzun ve sonuçların istatistiki güvenilirliği bakımından dezavantajlı bir yöntemdir (Manitz, 2008). Buna karşın analitik yöntemler daha hızlı bir şekilde çok daha fazla uygun konfigürasyonun değerlendirilmesine olanak sağlar. MHDP'nin doğası gereği özellikle problem boyutu büyüdükçe çok daha fazla çözüm alternatifinin değerlendirilmesi sorunu ortaya çıkar. Simülasyon ile bu sorunun giderilmesi mümkün değildir. Bu yüzden simülasyon kullanılan montaj hattı çalışmalarında genellikle bir sezgisel ile elde edilen nihai çözümün simülasyon ile performansının değerlendirildiği görülmektedir. Performans analizinde analitik yöntemlerin kullanılması daha hızlı ve etkin çözümlerin elde edilmesini sağlayacaktır. Bu yöntemlerin en yaygın olanlarından biri de kuyruk ağlarıdır (Lagershausen, 2013).

Kuyruk ağları (KA) esnek imalat sistemleri (Yao ve Buzacott, 1985), üretim akış hatları (Buzacott ve Shanthikumar, 1993), parti tipi üretim sistemleri (Buzacott ve Shanthikumar, 1993) gibi birçok üretim sisteminin performans değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. KA matematiksel altyapısı çok karmaşık olsa da analiz edilen sistem hakkında tam ve kesin sonuçlar veren bir tekniktir (Bolch, Greiner, Meer ve Trivedi, 2006). Ayrıca KA incelenen sistemde var olan problem için optimizasyon imkânı da sunmaktadır. Makine kullanım oranları, sistem çıktı hızı, çevrim zamanı, ortalama bekleme zamanları, ortalama iş sayısı (WIP) gibi performans ölçütlerinin en iyilenmesi için KA çeşitli optimizasyon algoritmalarına entegre bir şekilde kullanılmaktadır (Bitran ve Morabito, 1996). Literatürde KA çok yaygın uygulama alanları bulmuş olmasına rağmen, montaj hatlarının dengelenmesinde kullanımı çok fazla çalışılmamıştır.

Tez çalışmasında stokastik MHDP'nin KA ile modellenebilirliği irdelenmiş, teorik ilişkiler kurulmuştur. Ek olarak montaj hatlarında ortaya çıkan stokastik durumlar göz önünde bulundurularak yeni bir doğrusal olmayan matematiksel model önerilmiştir. Buna bağlı olarak problemin çözümü için KP ve KA'nın entegre çalıştığı bir prosedür geliştirilmiştir. Bu modelde amaç istasyon kullanım oranlarının düzgünleştirilmesidir. Kullanım oranlarının hesaplanması için bir kuyruk ağı performans değerlendirme tekniği olan difüzyon yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca KA kullanılarak hem hatta ürün gelişleri hem istasyonlarda görevlerin gerçekleştirilmesi için geçen süre hem de istasyonlar arası ürün geçişlerinin stokastik ortamda hat dengesine etkisi araştırılmıştır.

Araştırmada MHD ve performans değerlendirme yöntemlerinin bir arada kullanılmasının, her ne kadar avantajlı olsa da, alternatif çözümlerin değerlendirilmesinde uzun hesaplama zamanı gerektirdiği görülmüştür. Ayrıca çalışmada difüzyon yaklaşımının iteratif özelliğinin getirdiği hesaplama zamanı dezavantajı ve büyük problemlere çözüm bulunamaması nedeniyle kapalı formda ayrıştırma metoduna dayalı yeni bir doğrusal olmayan model geliştirilmiştir. Ayrıştırma metodunda ağdaki her bir düğüm tek tek ele alınarak performans değerleri hesaplanmakta daha sonra bu değerler toplam performansın belirlenmesinde kullanılmaktadır. Her bir düğümün ayrı ayrı ele alınması ile her düğüm bir kuyruk modeli olarak düşünülmekte ve basitçe kapalı form ifadeler ile performans değerleri tespit edilmektedir. Kapalı form ifadelerin herhangi bir optimizasyon problemi içerisine entegre edilmesi ile problemin çözümü ve performans değerlendirmesi birlikte yapılmış olmaktadır. Tez çalışmasında bir ayrıştırma metodu MHDP ile entegre hale getirilerek amaç fonksiyonunun belirlenmesinde kullanılmış, hattın yeni dengesi ve görev atamaları elde edilmiştir.

Tez çalışmasında ele alınan deterministik ve stokastik montaj hattı dengeleme problemleri gerçek hayatta işletmelerin sıklıkla karşılaştıkları problemler olması nedeniyle çözümlerinin ekonomik ve pratik katkıları da olacaktır. Çalışmanın akademik literatüre de önemli katkıları olacaktır. Üretim sistemlerinin performans değerlendirmesinde sıklıkla kullanılan kuyruk ağları ile üretim sistemlerinde önemli bir NP-zor tipinde (Wee ve Magazine, 1986) problem olan MHD'nin birlikte ele alınması akademik alanda yeni çalışmaların üretilmesi için bir başlangıç noktası olacaktır.

Tez çalışmasının devamı şu organizasyon ile ilerlemektedir. İkinci bölümde tez çalışmasında ele alınan MHDP'nin tanımı, temel kavramları ve sınıflandırması, performans değerlendirme metodu olarak kullanılan KA'nın tanımı temel kavramları ve sınıflandırması ile çözüm yöntemi olarak kullanılan KP hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde MHDP, KA'nın üretim uygulamaları ve KP modelleri ile çözülen problemler hakkında literatür araştırması verilmiştir.

Dördüncü bölümde verilen bir istasyon sayısı ile çevrim zamanının en küçüklenmesini amaçlayan deterministik MHDP için atama kısıtlarının da dâhil edildiği bir KP modeli

geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin performansı atama kısıtlarının üç farklı durumu için literatürde yer alan test problemleri ile değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde stokastik montaj hatlarının tasarım problemi için bir doğrusal olmayan model geliştirilmiştir. Bu modelde üretimde ortaya çıkan değişkenliğin hat dengesine ve performansına etkisi araştırılmıştır. MHDP ve KA yaklaşımı bir KP modeli içerisinde kullanılarak yeni bir çözüm prosedürü önerilmiştir. Çözüm prosedürü orta büyüklükteki problemlerin çözümü için iyi sonuçlar üretmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlardan pratik ve uygulamada yöneticilere fikir sağlayacak çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur. Önerilen modelin performans ölçütlerinin belirlenmesinde etkili olup olmadığı montaj hatlarında ortaya çıkan çanak etkisinin araştırılması ile değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde, bir önceki bölümde kullanılan iteratif yaklaşımın büyük boyutlu problemlerin çözümünde kullanılamaması nedeniyle yeni bir ayrıştırma metodu tabanlı doğrusal olmayan model geliştirilmiştir. Önerilen modelin amaç fonksiyonu WIP en küçüklemesidir. Ancak model bunu sağlarken kapalı form ifadelerin birbirine bağlı ifadeler olması nedeniyle, istasyon kullanım oranları, istasyon iş yükü, istasyonlar arası bekleme zamanları ve hat çıktı hızı hakkında da bilgiler üretebilmektedir. Önerilen model farklı değişkenlik katsayıları ve talepler arası geliş zamanları parametreleri için literatürde var olan problemler ile test edilmiştir. Modelin çözümü için yine KP'den faydalanılmıştır. KP modelinden elde edilen nihai çözümün performans sonuçları, bu çözümün simülasyon modelinden elde edilen performans sonuçları ile karşılaştırılarak önerilen modelin etkinliği tartışılmıştır. Ayrıca istasyon iş yükü, bekleme zamanları ve WIP üzerinde parametrelerin değiştirilmesi ile modelin nasıl bir tepki verdiği araştırılmıştır.

Yedinci bölümde ise çalışma sonuçları genel olarak değerlendirilmiş ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. TEMEL KAVRAMLAR VE YÖNTEMLER

Çalışmanın izleyen bölümlerinde dikkate alınan montaj hattı dengeleme problemleri, kısıt programlama ve kuyruk ağları ile ilgili önemli olduğu düşünülen bazı temel kavramlar bu bölümde açıklanacaktır.

2.1. Montaj Hatları ve Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Üretim, belirli bir sistem içerisinde mallar ve hizmetler üzerinde bir dizi işlem uygulayarak katma değer oluşturan faaliyettir. Bu belirli sistem çerçevesinde üretim sistemi, üretim faaliyetinin alt bileşenleri ile bir sistematik içerisinde değerlendirildiğinde doğal kaynaklar, işgücü, bilgi ve sermaye girdilerinin bir dönüşüm sürecinden geçirilerek ürün, yarı ürün, hizmet veya atıkların elde edildiği bir yapı olarak tanımlanabilir (Çerçioğlu, 2009). Üretim sistemleri dönüşüm sürecindeki ürün çeşidi ve üretim miktarlarına göre;

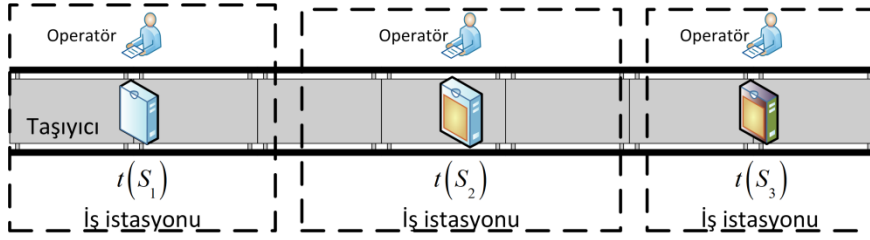
- i. Siparişe göre üretim, ürün çeşitliliğinin fazla fakat miktarlarının düşük olduğu müşteri talebine özel üretimin gerçekleştirildiği üretim sistemidir.
- ii. Parti üretimi, çok çeşitli veya çok modellenli belirli bir siparişi karşılamak üzere ürünlerin partiler halinde üretildiği sistemdir.
- iii. Seri üretim, büyük miktarda düşük çeşitliliğe sahip ürünlerin üretiminin yapıldığı üretim sistemi olarak üçe ayrılırlar.

Karakteristik özellikleri ürün akışının olması ve üretim hattının ürüne göre tasarlanması olan seri üretim sistemlerinde, girdiler belirli bir sırada dizilmiş işlem birimlerinden geçerek son ürün haline getirilir ve sistemi terk ederler.

2.1.1. Montaj hatlarında temel kavramlar

Montaj işlemi belirli bir düzende sıralanmış iş istasyonlarında çalışan işçi gruplarının bir ürüne ait alt bileşenleri veya parçaları bir araya getirmesi işi olarak tanımlanır. Montaj işlemi sırasında iş parçası bir akış hattı boyunca transfer edilerek parça üzerindeki işlemler gerçekleştirilir. Bu işlemler sırasında alt bileşenler arasında ürün karakteristiği ve üretim gerekliliklerinden doğan öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı gibi kısıtlar ortaya çıkar.

Bir ürünün elde edilmesi için gerekli görevlerin, öncelik ilişkileri, çevrim zamanı ve atama kısıtları gibi kısıtlar altında gruplandırılarak oluşturulan istasyonların bir hat boyunca sıralanmasıyla meydana gelen sisteme montaj hattı (Şekil 2.1), ürün oluşumu sırasında yapılması gereken görevlerin bu kısıtlar sağlandığında bir performans ölçütünü eniyileyecek şekilde istasyonlara atanmasına montaj hattı dengeleme problemi denir (Gökçen, 1994).



Şekil 2.1. Örnek bir montaj hattı tasarımı

İlk olarak Bryton (1954) tarafından yapılan tez ile ortaya atılan MHD'nin avantajları;

- Yüksek işçi ve makine üretkenliği.
- Fazla miktarda işlem tekrarlılığı.
- Çalışanların işi kolay öğrenmesi.
- İşlerin hattaki istasyonlar arasında eşit olarak dağıtılması.
- Montaj hatlarında yüksek miktarda süreç içi stok olmaması, olarak verilebilir.

MHDP'de kullanılan bazı kavramlar Çizelge 2.1'de açıklanmıştır (Scholl, 1999).

Çizelge 2.1. MHDP için temel kavramlar

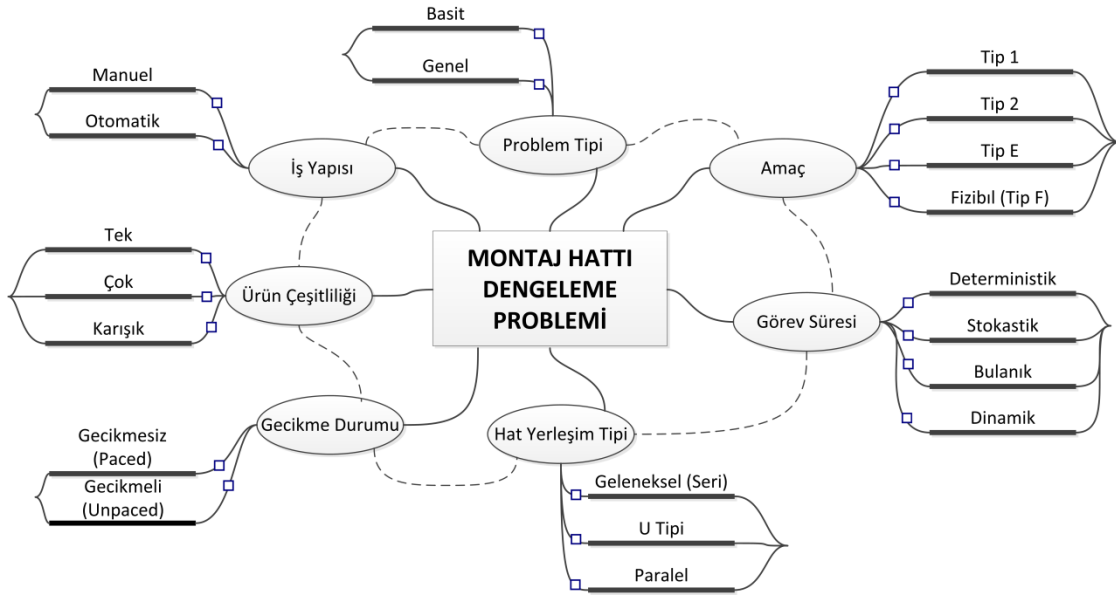
Kavram	Açıklama
Görev	Daha fazla ayrıştırılması mümkün olmayan en küçük iş ögesidir. Hatta $\ T\ $ adet görev vardır.
Görev zamanı	Bir görevi tamamlamak için gerekli süre olup i görevine ait işlem zamanı t_i ile gösterilir.
İş istasyonu	Hatta yapılması öngörülen toplam iş miktarının bir kısmının yerine getirildiği yerdir. $\ T\ $ adet görevin n adet alt kümesi bir k istasyonunda gerçekleştirilir ve toplam istasyon sayısı $\ W\ $ ile gösterilir.

Çizelge 2.1. (devam) MHDP için temel kavramlar

Kavram	Açıklama
Çevrim zamanı	Bir montaj hattında tamamlanıp çıkan ardı ardına iki ürün arasındaki zamandır, c ile gösterilir.
İstasyon zamanı (İş yükü)	Bir istasyonda yapılan görevlerin zamanları toplamıdır. k istasyonu için $t(S_k)$ ile gösterilir.
İstasyon gecikmesi	Çevrim zamanı ile istasyon zamanı arasındaki farktır; $(c - t(S_k) \quad k \in W)$.
Öncelik diyagramı	Bir ürünün montajı sırasında yapılması gereken görevlerin işlem sıralarının şematik olarak gösterimidir.
Öncelik matrisi	Öncelik diyagramında i görevini j görevi takip ediyorsa i . satır j . sütunun 1, aksi halde 0 olduğu matristir.
Denge gecikmesi	Operatörlerin boş kaldığı toplam süredir; $(\ W\ \cdot c - \sum_{i \in T} t_i)$
Düzensizlik indeksi	Bir montaj hattında iş yükü dağılımının istasyonlar arasında dağılımının düzensizliğini/eşitliğini gösteren bir indekstir; $SI = \sqrt{\sum_{k \in W} (\max[t(S_k)] - t(S_k))^2}$
Sıralama gücü (Order strength)	Öncelik diyagramındaki öncelik ilişkisi sayısının $\ T\ \cdot (\ T\ - 1) / 2$ değerine bölümü ile elde edilir, OS ile gösterilir.
Esneklik oranı	Esneklik oranı montaj işlemindeki görevlerin öncelik ilişkisine göre bulunabilecek uygun sıralamaların nispi belirleyicisidir; $(1 - OS)$
Zaman değişkenlik oranı	Bir problemdeki görev sürelerinin en büyük değeri ile en küçük değerinin oranlanması ile hesaplanır $(TV = t_{\max} / t_{\min})$. Bu değer küçük olması test problemindeki görev zamanlarının küçük bir aralıkta değişkenlik gösterdiğine büyük olması büyük bir aralıkta değişkenlik gösterdiğine işaret eder.
İstasyon tıkanması (Blocking)	İstasyondaki yetersiz bekleme yeri kapasitesi veya istasyondaki görevlerin zamanında tamamlanamaması nedeniyle görevin istasyonda beklemesidir.
İstasyon açlığı (Starving)	İstasyon uygun fakat işlem için herhangi bir görev yok ise istasyon açıktır.

2.1.2. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

MHDP'ni çeşitli açılardan sınıflandırmak mümkündür. İşlem zamanları açısından deterministik, stokastik, bulanık ve dinamik MHDP olarak dörde ayırmak mümkündür. Ayrıca sistemdeki ürün çeşitliliğine göre tek, çok ve karışık modelleri hatlar olarak da MHDP sınıflandırılabilir. MHDP için literatürde yapılmış sınıflandırma kategorileri göz önüne alınarak Şekil 2.2'de verilen MHDP sınıflandırma diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 2.2. MHDP'nin sınıflandırma diyagramı

MHDP problem tipine göre ikiye ayrılır. Basit MHD, montaj hattı dengeleme problemlerinin en basit ve orijinal halidir. Bu problem tipine paralel istasyonlar, bölgeleme kısıtları, kaynak kısıtları gibi bazı kısıtlamalar veya faktörler eklenirse problem Genel MHD olarak adlandırılır.

MHD problemde yer alan işlerin/görevlerin yapısına göre; görevler operatör veya operatör grupları vasıtasıyla insan eli ile gerçekleştiriliyorsa manuel, görevler istasyonlarda otomatik kontrollü malzeme taşıma sistemleri ve otomatik ekipmanlar ile gerçekleştiriliyorsa otomatik hatlar olarak sınıflandırılır.

Sistemde bulunan ürün çeşitliliğine göre MHD tek, çok ve karışık modelleri hatlar olarak üçe ayrılır. Tek modelleri hatlarda tek tip ürün bulunurken, çok modelleri hatlarda değişik

modellerin üretimi ayrı ayrı kafiyeleler halinde yapılır. Karışık modelli hatlarda ise aynı anda birden fazla benzer tipteki modellerin karışık olarak üretimi söz konusudur.

Montaj hatları gecikmesiz (paced/unbuffered) ve gecikmeli (unpaced/buffered) olarak iş parçalarının üretim hattında hareketine göre ikiye ayrılmaktadır. Çevrim zamanının her istasyon için eşit olarak verildiği ve görevlerin zamanında tamamlandığının varsayıldığı hatlar gecikmesiz hatlar olarak adlandırılır. Gecikmeli hatlarda istasyonlar ara stoklar ile desteklenmiştir. Bir iş parçası sonraki istasyondaki görev tamamlanana dek istasyon önündeki ara stoklarda bekleyebilir. Montaj hattı problemleri genel olarak gecikmesiz hatlar olarak modellenir de montaj hatları gibi akış tipi üretim sistemlerinde gecikmeli hatlar söz konusudur (Scholl, 1999). Gecikmeli hatlarda istasyonların bloke olması ve aç kalması durumu ile karşılaşılabilir. Bloke olma durumu bir istasyonda işlemi biten iş parçasının sonraki istasyona geçememesi halinde ortaya çıkar. İstasyon açlığı ise bir istasyona gelmesi gereken iş parçasının istasyona ulaşamaması durumunda ortaya çıkar. Bu durumlar istasyonlar arasında ara stok atanarak önlenmeye çalışılır. Ancak, ara stokların atanması ve miktarları üretim oranını doğrudan etkilese de depolama, malzeme taşıma ve stok maliyetlerinde artışa neden olmaktadır.

İstasyonların bloke olması veya aç kalması durumu görev zamanlarının dolayısıyla istasyon zamanlarının tipine de bağlıdır. Stokastik MHDP’de stokastik görev süreleri istasyon iş yüklerinin çevrim zamanını aşmasına ve hatta bloke veya aç kalma durumlarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Scholl, 1999). Ayrıca bu tür hatlarda hatta gelen iş parçalarının geliş disiplinleri de önem kazanmaktadır. Bu bağlamda MHDP sabit (fixed) ve değişken (variable) geliş disiplinleri olarak ikiye ayrılmaktadır (Scholl, 1999). Sabit oranlı gelişlerde ardışık birimler belirli bir zaman aralığı (çevrim zamanı) ile hatta gelirken değişken hatlarda iş parçaları değişken zaman aralıkları ile hatta gelmektedir. Yani iki iş parçasının hatta gelişleri arasındaki zaman değişkendir.

Montaj hatları yerleşim düzeni olarak geleneksel (seri/düz), U-tipi ve paralel olarak sınıflandırılır. MHDP amaçlarına göre ise genellikle;

- Tip 1, sabit çevrim zamanı ile istasyon sayısının en küçüklenmesi
- Tip 2, sabit istasyon sayısı ile çevrim zamanının en küçüklenmesi problemi (yeniden dengelenme problemi olarak da adlandırılır)
- Tip E, istasyon zamanı ve çevrim zamanının aynı anda en küçüklenmesi

- Tip F, verilen bir çevrim zamanı ve istasyon sayısı için sadece fizibil bir çözümün belirlenmesi

şeklinde sınıflandırılır. Bu tür amaçlar genel olarak kapasite temelli amaçlar olarak adlandırılır. Bu amaçların yanı sıra istasyon kullanım oranlarının (utilizations) dengelenmesi (eşitlenmesi), ürün akış zamanı en küçüklenmesi, ürünlerin bekleme zamanlarının en küçüklenmesi gibi kapasite temelli amaçlar da söz konusudur (Scholl, 1999).

MHDP'nin çözümü için geliştirilen yöntemler en iyi çözümü bulan (kesin) ve yaklaşık (sezgisel) yöntemler olarak ikiye ayrılır. Kesin yöntemler çok uzun işlem zamanı gerektirirken, yaklaşık yöntemler problemin kabul edilebilir bir çözümünü hızlı olarak elde edebilirler.

Özellikle gecikmeli hatlarda hat değişkenliğinden ortaya çıkan dengesizlik ve bunun istasyonlar arası dağılımı bilinmiyorsa, tekrarlı bir şekilde hatta görev atamaları tanımlanmalı ve çıktı oranları hesaplanmalıdır. Bu çıktı oranları simülasyon ve kuyruk teorisi kullanılarak tahmin edilebilmektedir (Scholl, 1999).

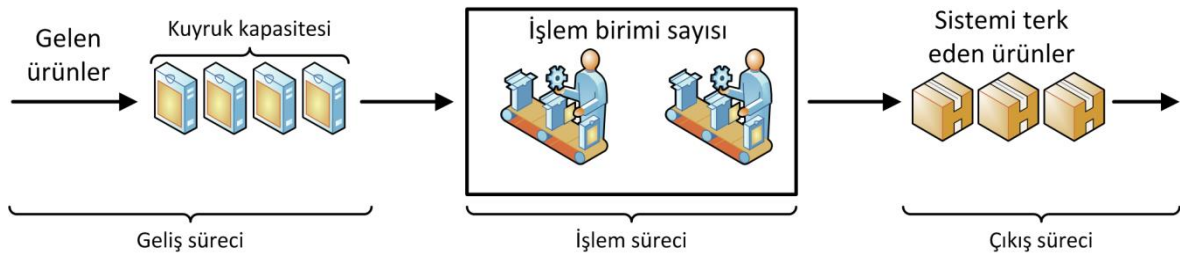
2.2. Kuyruk Ağları

Bir kuyruk sistemi müşterilerin hizmet almak/görmek amacıyla sisteme geldikleri, eğer sistem hazır değilse bekleyip işlemi bittikten sonra sistemi terk ettikleri bir sistem olarak tanımlanabilir. Buradaki müşteri sadece insan olarak algılanmamalıdır. Bir üretim sistemi için müşteri ürün olarak düşünülebilir (Gross, Shortle, Thompson ve Harris, 2008: 2).

Bir kuyruk sistemi karakteristik bazı özelliklere sahiptir. Bunlar ürünlerin geliş süreci, işlem süreci, çıkış süreci, kuyruk disiplini, kuyruk kapasitesi, hizmet veren birim sayısı ve işlem aşamalarıdır. Tipik bir kuyruk süreci Şekil 2.3'te verilmiştir.

Genel bir kuyruk geliş süreci, ürünlerin gelişler arası zamanının olasılık dağılımı bilinen bir stokastik süreç takip eder. Ürün sisteme gelir gelmez bir işlem yapmak üzere karar verir. Sistemdeki kuyruk durumuna göre sisteme giriş yapma veya terk etme davranışı gösterebilir. Sisteme giriş yapan bir ürüne işlem süreci tarafından hizmet sağlanır. Bu hizmet işlem birim(ler)i tarafından yerine getirilir. İşlem gören ürünler için deterministik

veya stokastik işlem zamanları söz konusudur. Eğer işlem zamanı stokastikse, işlem süreci bir olasılık dağılımını takip eder. Bu işlem tek ürün için yapılabilirken ürünlerin bir parti büyüklüğü için de yapılabilir. Geliş ve işlem süreçleri sistemdeki kuyruk uzunluğu dağılımının tespitinde etkili karşılıklı bağımsız birer süreçtirler. Çıkış süreci ise geliş ve işlem sürecine bağlı olarak işlemi tamamlanan ürünlerin sistemi terk etme sürecidir. Çıkış süreci tek kanallı kuyruk sistemlerinde önemli bir yer tutmasa da sistemin bir kuyruk ağı topolojisinde olduğu durumlarda iki işlem birimi arasındaki çıkış ve giriş yapısını etkilediği için önemli hale gelmektedir. Bu durumda çıkış süreci de geliş ve işlem süreçleri gibi stokastik bir dağılım gösterir.



Şekil 2.3. Tipik bir kuyruk süreci modeli

Kuyruk disiplini sisteme giriş yapan ürünlerin kuyruktan nasıl bir sıra ile seçilip işleme alınacağını tarif eder. Birçok kuyruk ilk gelen ilk işlem görür (First Come First Served-FCFS) kuyruk disiplinine sahiptir. Ancak son gelen ilk işlem görür, rastgele seçim ve öncelikli seçim gibi diğer kuyruk disiplinleri de mevcuttur.

Bazı kuyruk sistemlerinde bekleme yerleri belirli bir kapasiteye sahip olabilir ki buna ara stok (buffer) denilmektedir. Genel kuyruk modellerinde işlem veren (işlemci) sayısı birdir. Fakat çok işlemcili ve paralel işlemcili kuyruk sistemleri de modellenebilmektedir. Herhangi bir tek işlemcili kuyruk sisteminde işlem genellikle tek adımdan oluşurken çok aşamalı kuyruk sistemlerinde süreç birden fazla işlemin sıralı bir yapısında olabilir.

Genel olarak bu karakteristiklere sahip bir kuyruk sistemini Kendall (1953) A/B/X/Y/Z şeklinde bir ifade ile göstermiştir. Burada A gelişler arası zamanın dağılımını, B işlem zamanı dağılımını, X paralel işlemci sayısını, Y kuyruk kapasitesini, Z ise kuyruk disiplinini ifade eder. Örneğin M/G/2/∞/FCFS şeklindeki notasyon üssel dağılımlı gelişler arası zamana, genel dağılımlı işlem zamanına, iki paralel işlemciye, sonsuz bekleme yeri

kapasitesine ve ilk gelen ilk işlem görür kuyruk disiplinine sahip bir kuyruk sistemini gösterir.

Bir kuyruk sistemi genellikle tek başına hizmet veren bir istasyonu ifade eder. Çalışmanın temel konularından olan kuyruk ağları ise birden fazla kuyruk sisteminin bir süreç kontrolü ile birbirine bağlanmış bir ağ yapısı ile ifade edilmesidir.

2.2.1. Kuyruk ağlarında temel kavramlar

Bu bölümde kuyruk ağları ile ilgili temel kavramlar ve performans ölçütlerinin tanımlaması yapılmıştır. Bu parametrelerden özellikle performans ölçütlerinin türetilmesi ve arasındaki ilişki Little (1961) tarafından aşağıdaki teorem ile gösterilmiştir.

2.2.1. Teorem

Tüm işlem birimleri veya bütün sistem için ortalama ürün sayısı, çıktı hızı ve ortalama işlem zamanı arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bir sistemdeki ortalama ürün sayısının birim zamandaki çıktı hızı ve ürünün sistemdeki geçirdiği ortalama işlem zamanının çarpımı ile ifade edilebildiğini açıklar.

Çizelge 2.2’de kuyruk ağları için temel kavramlar açıklanmıştır.

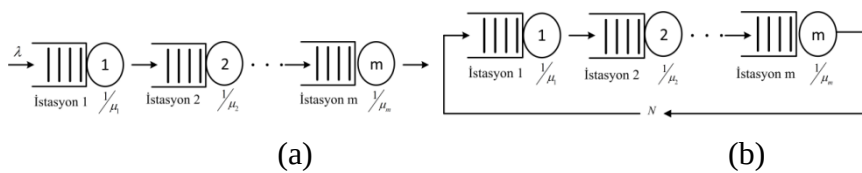
2.2.2. Kuyruk ağlarının sınıflandırılması

Kuyruk ağları, birden fazla kuyruk sisteminin birbirini takip etmesinden oluşan sistemler olarak tanımlanmaktadır. Kuyruk ağları, tek işlem yapan istasyona sahip modellere göre daha fazla kaynağa sahip kuyruk sistemlerinin modellenmesi için uygundur. Bir kuyruk ağında birbirine bağlı en az iki işlem merkezi vardır. Bir işlem merkezi (düğüm) gerçekte bir kaynağı temsil eder. Bir iş ağdaki iki düğüm arasında transfer edilir (Pınarbaşı, 2010). Bu bölümde kuyruk ağlarının karakteristik açıdan sınıflandırması verilecektir.

Kuyruk ağları genellikle açık ve kapalı ağlar olarak ikiye ayrılır. Şekil 2.4’te verilen kuyruk ağlarında daire ile gösterilenler düğüm veya istasyonları, içleri çizgili dikdörtgen ile gösterilenler istasyonlar önündeki bekleme yerlerini, oklar ise ürün akışını göstermektedir.

Çizelge 2.2. Kuyruk ağları için temel kavramlar

Kavram	Açıklama
Görev zamanı	Bir görevin atandığı istasyonda gerçekleştirilmesi için geçen sürenin bağımsız rastgele değişken olarak bir dağılım fonksiyonu ile ifadesidir. Kuyruk süreçlerinde μ işlem oranı olarak gösterilir ve görev süresinin tersi $(1/t_i, i \in T)$ ile hesaplanır.
Gelişler/talepler arası zaman	Ardışık iki iş parçasının işlem görmek üzere kuyruk sistemine gelişleri arasında geçen zamandır. Bir olasılık dağılımı ile gösterilir. μ_A gelişler arası zaman olmak üzere $\lambda = 1/\mu_A$ geliş oranı ile gösterilir ve hesaplanır.
Kullanım oranı	Kuyruk sistemindeki bir işlem merkezinin (istasyonun) toplam çalışma zamanı içerisinde çalışır şekilde olduğu orandır. Sistemde bulunacak ürün sayısında herhangi bir kısıtlama olmadığı durumunda kullanım oranı $\rho = \lambda/\mu$ olacak şekilde gelişler arası oranın işlem oranına bölünmesi ile hesaplanır.
Çıktı hızı	Bir kuyruk sisteminde birim zamanda işlemi tamamlanıp sistemi terk eden ortalama ürün sayısı olarak tanımlanır. Kuyruk sisteminde çıkış sürecinin bir göstergesidir. Sistem kararlı durumda iken çıktı hızı geliş oranına (λ) eşittir.
Bekleme zamanı	Bir ürünün işlem görmek için kuyrukta geçirdiği süredir ve T_q ile gösterilir.
Çevrim zamanı (Akış zamanı)	MHDP'den farklı olarak çevrim zamanı kuyruk teorisinde bir ürünün sistemde geçirdiği toplam zaman olarak tanımlanır. Bekleme zamanı ile görev süresinin toplamına eşittir $(T = T_q + 1/\mu)$.
Kuyruk uzunluğu	Bir kuyruktaki ortalama ürün sayısıdır. Teorem 2.2.1'e göre $Q = \lambda \cdot T_q$ olarak belirlenir.
Sistemdeki ortalama ürün sayısı	Kuyruk sistemindeki ortalama ürün sayısıdır $\bar{K}$ veya WIP olarak gösterilir. Teorem 2.2.1'e göre $\bar{K} = \lambda \cdot T$ olarak belirlenir.



Şekil 2.4. Kuyruk ağları (a) Açık (b) Kapalı

- *Açık kuyruk ağları*; ürünlerin bir veya daha fazla yolla dışarıdan gelerek işlem gördükleri ve sonrasında sistemi terk ettikleri modellerdir. Açık ağlarda sistemdeki müşteri sayısı rastgele gelişlere ve çıkışlara bağlı olarak zamanla değişir.
- *Kapalı kuyruk ağları*; sistemdeki ürün sayısının sabit olduğu ve sürekli bir şekilde sistemde dolaştıkları modellerdir. Bu ağlarda dışarıdan girişler veya sistemden çıkışlar söz konusu değildir.

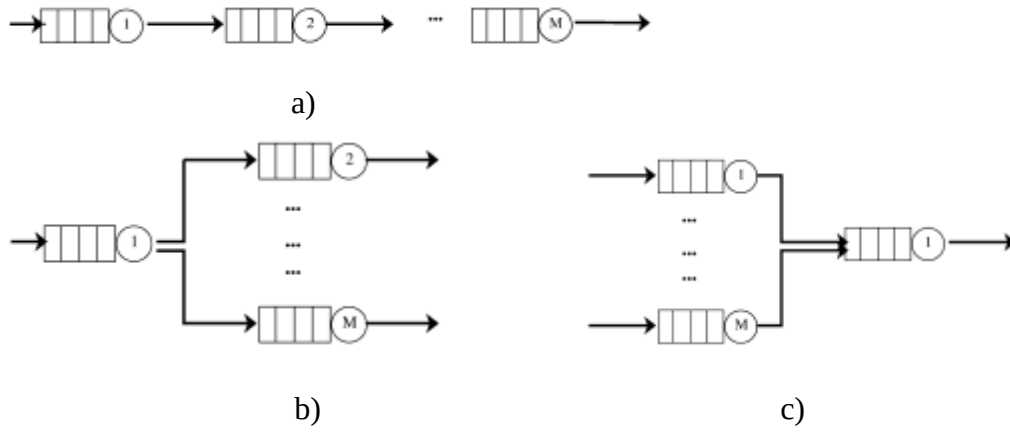
Bu tanımlamaya ek olarak kuyruk ağları sistemdeki ürün tiplerinin sayısına göre de ikiye ayrılırlar. Bunlar;

- *Tek ürünli kuyruk ağları*; sistemdeki ürünlerin aynı özellikte varsayıldığı
- *Çok ürünli kuyruk ağları*; sistemdeki ürünlerin değişik özellikte olduğu, işlem sürelerinin, izlediği yolların vb. niteliklerin ürünlerin tiplerine bağlı olduğu ağlardır.

Topoloji yönünden kuyruk ağları, istasyonların üç temel düzenlemesinin kombinasyonundan oluşmaktadır: tandem (sıralı), birleşen ve ayrışan (Şekil 2.5). Tandem topolojide istasyonlar birbiri ardınca sıralanmışlardır. Eğer ağ, kapalı bir ağ ise bu tip sistemlere Döngüsel Ağ adı verilir. Ayrışan topolojilerde bir istasyon $M(>1)$ istasyona ilintilenmiştir. İlk seviye j istasyonunda işlemi biten bir müşteri, takip eden seviyedeki bir k istasyonuna p_{jk} olasılığı ile ilerler. Birleşen topolojide ise birden çok akış bir istasyona ilintilenmiştir (Bolch ve diğerleri, 2006).

Ayrıca kuyruk ağları işlem yapan istasyonların bloke durumuna göre de sınıflandırılabilir.

- *Blokesiz Kuyruk Ağları*: Ağdaki bütün kuyrukların sonsuz kapasitede olduğu sistemlerdir. Sınırsız sistemler olarak da adlandırılır.
- *Blokeli Kuyruk Ağları*: Ağdaki bazı veya tüm istasyonların bekleme yerlerinin belirli bir sayıda olduğu sistemlerdir. Sınırlı sistemler adı da verilir. Böyle bir ağda, sınırlı sayıda bekleme yeri olan kuyruğa ilerleyen ürün eğer bekleme yerleri dolu ise bloke durumu ile karşılaşır. Bu durum;
 - İşlem Sonrası Bloke
 - İşlem Öncesi Bloke
 - Tekrarlı Bloke olarak üç ana bloke çeşidi ile betimlenir



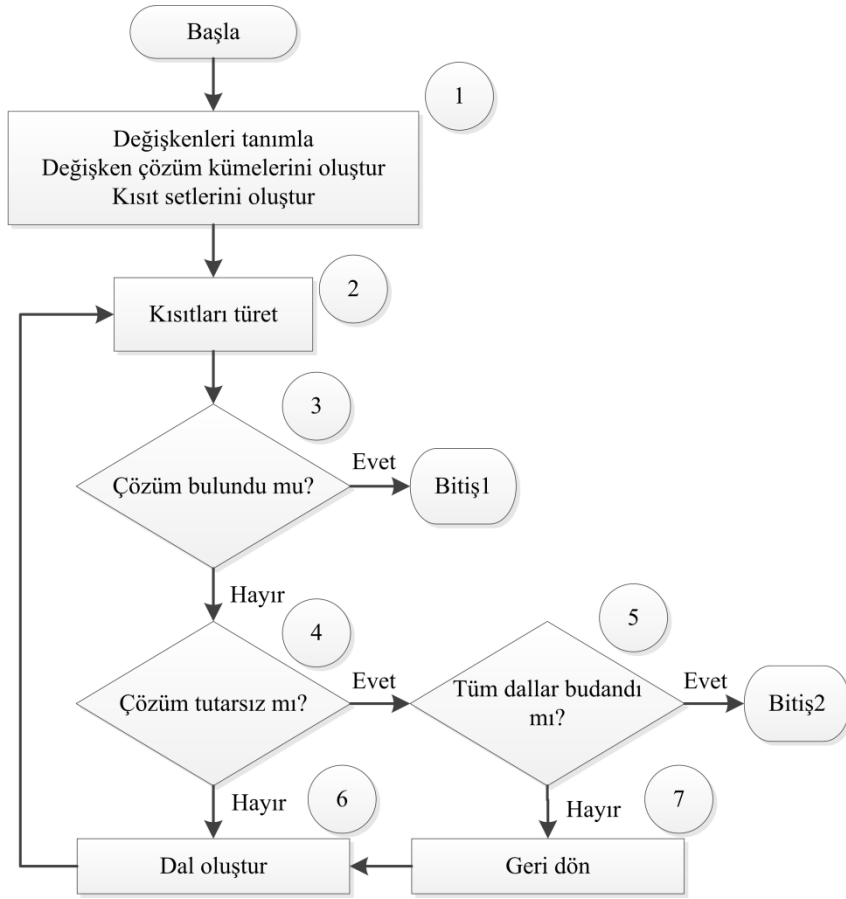
Şekil 2.5. Kuyruk ağı topolojileri (a) Tandem (Sıralı) (b) Ayrışan (c) Birleşen

Yukarıda bahsedilen sınıflandırmaların herhangi bir uygun kombinasyonu kullanılarak kuyruk ağları gerçek hayattaki birçok sisteme uyarlanabilir ve performans değerlendirmesinde kullanılabilir. Bu çalışmada stokastik montaj hatları blokesiz, tek ürünli, sıralı topolojiye sahip bir açık kuyruk ağı olarak modellenmiş ve hat performansı değerlendirilmiştir.

2.3. Kısıt Programlama

Çalışmanın temel amaçlarından biri NP-zor problemler sınıfına giren MHDP'ye (Wee ve Magazine, 1986) ileri seviye bir çözüm tekniği önermektir. Kısıt programlama doğrusal programlamanın optimal çözüme ulaşma gücü ile mantıksal bilgisayar programlamanın kolay tanımlanma özelliklerini bir arada kullanan, matematiksel programlamaya alternatif güçlü bir modelleme ve çözüm metodudur. KP, çok veya tek amaçlı dal-sınır, dinamik programlama gibi diğer kombinatoriyal çözüm metotları arasında yer alan bir kesin çözüm tekniğidir (Talbi, 2009: 18-19). KP'nin temel kavramı kısıtlardır. Bir KP modeli değişkenler, değişkenlerin alabileceği muhtemel değerler ve kısıtlar setinden oluşur. Domain (çözüm kümesi) karar değişkenlerine atanabilecek muhtemel değerler olarak ifade edilir. Her bir kısıt bazı değişkenler ve bu değişkenlerin çözüm kümesinin birer ilişkisi şeklinde tanımlanır. Bu kısıtlar doğrusal, doğrusal olmayan, mantıksal ve global kısıtlar şeklinde olabilir.

Kanet, Ahire ve Gorman (2004) genel bir KP çözüm algoritmasını Şekil 2.6'da özetlemiştir. Bu şekil üzerinden KP için genel çözüm kavramlarından kısaca bahsedilecek, ilerleyen bölümlerde detayları verilecektir.



Şekil 2.6. Genel kısıt programlama çözüm algoritması (Kanet ve diğerleri, 2004)

KP modele ait değişkenler, onların çözüm kümeleri ve kısıt setlerinin tanımlanması ile başlar (blok 1). Burada tanımlanan kısıtlar bir çözümün uygunluğunun ve değişkenlere ait çözüm kümelerinin azaltılması için kullanılırlar. Özel filtreleme algoritmaları kullanılarak sistematik bir şekilde her bir kısıt için değişkenlerin çözüm kümelerinin daraltılması kısıt türetme ve çözüm kümesi azaltma olarak tanımlanır (blok 2). Bu adımlardan sonra probleme ya çözüm bulunmuştur ki bu durumda algoritma sonlanır, ya da sonraki adıma geçilir (blok 3). Blok 4'te ise herhangi bir çözüme ulaşılmaması durumunda tutarsızlık kontrolü yapılır. Tutarsızlık herhangi bir değişkenin çözüm kümesinin hiçbir elemana sahip olmaması durumudur. Eğer tutarsızlık kontrolü başarısız olursa bazı arama stratejileri ile yeni bir dal (çözüm) oluşturulur (blok 6). Dal oluşturma ana problemin geçici kısıtlar eklenerek yeni alt problemlere bölünmesidir. Eğer yeni bir dal oluştu ise çözüm tekrar

kısıtların türetilmesi ve çözüm kümelerinin azaltılması için blok 2'ye gönderilir. Blok 4'te tutarsızlık kontrolü başarılı olursa (yani o anki çözüm tutarlı ise), blok 5'te tüm uygun alt problemlere ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Eğer tüm dallar budandı ise algoritma sonlanır, aksi halde geriye dönüp (backtracking) yeni bir çözüm üretilir (blok 7).

Problemin KP modeli olarak çok iyi ifade edilmesi çözüm sürecinin etkinliği üzerinde çok etkilidir (Rossi, Beek ve Walsh, 2006). Bu yüzden KP modelinin oluşturulmasına özellikle özen gösterilmelidir ve problem özelliklerini iyi çözümleyen bir KP çözücüsü seçilmelidir.

2.3.1. Kısıt problemleri

KP modelde amaç fonksiyonun olup olmamasına göre ikiye ayrılır: kısıt sağlama problemleri (KSP) ve kısıt optimizasyonu problemleri (KOP). KSP modelde bir amaç fonksiyonunun olmadığı problemler iken KOP en büyükleme veya en küçükleme türünde bir amaç fonksiyonu içeren problemlerdir.

Kısıt sağlama problemleri

Biçimsel bir KSP aşağıdaki gibi tanımlanır.

2.3.1. Tanım

Bir KSP üç notasyonlu olarak (X, D, C) şeklinde gösterilir. Burada,

- X , değişkenlerin sonlu bir setidir $X = \{x_1, \dots, x_n\}$
- D , çözüm kümesi (domain) olarak adlandırılır ve her bir değişkenin alabileceği mümkün değerler kümesidir, $v_i \in D(x_i) \ i = 1, \dots, n$.
- $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ kısıtlar setidir. C , X kümesinden bazı değişkenler ile SC_j ; $C_j \subseteq D(x_1) \times \dots \times D(x_k)$, $SC_j \subseteq X$ değişkenlerinin bir alt kümesi olan $var(C_j) = (x_1, \dots, x_k)$ arasındaki ilişkidir.

KSP'nin bir çözümü tüm kısıtları sağlayacak şekilde değişkenlerin aldığı değerlerden oluşur. Bir çözüm değişken ve bu değişkenlerin aldığı değerler şeklinde çiftler halinde gösterilir, $A = \{(x_1, v_1), (x_2, v_2), \dots, (x_r, v_r)\}$. Eğer bu çözüm tüm problemdeki kısıtları

sağladıysa çözüm tutarlıdır, eğer bir veya bir kaç kısıtı sağlamadıysa çözüm tutarsızdır denir. Tüm değişkenlerin kendi çözüm kümelerinden bir değer aldığı çözümler tam çözümler, bazı değişkenlerin değer alamadığı çözümler ise kısmi çözümler olarak tanımlanır (Solnon, 2010: 27-50).

Özetle bir KSP şu şekilde formüle edilir (Lustig ve Puget, 2013),

$$\begin{aligned} C_i = (x_1, x_2, \dots, x_n) &= 1, & 1 \leq i \leq m \\ x_j &\in D_j, & 1 \leq j \leq n \end{aligned}$$

Bu modelde $C_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ kısıtlar setindeki tüm kısıtlar sağlanırsa, yani 1'e eşit olursa, tutarlı bir çözüme ulaşılmış demektir. Bir KSP probleminin çözüm algoritmasında iki temel adıma ihtiyaç duyulur: değişken seçimi ve değer seçimi. Değişken seçimi, bir çözüm oluşturmak için arama ağacının herhangi bir dalında hangi değişkenin seçileceği ile ilgilidir. Değer seçimi ise dal oluşturmak üzere seçilmiş değişkene değer ataması ile ilgilidir. Bir KSP algoritmasının temel adımları sonraki bölümlerde anlatılacaktır.

Arama ağacı

Bir arama ağacında, değişkenler düğümler ve bu değişkenler ile ilgili mümkün çözümler ise dallar ile gösterilir. Bir arama boş bir çözüm vektörü ile başlar ve değer atanabilecek değişken kalmayıncaya dek devam eder. Eğer arama bir mümkün çözüme ulaşamadıysa, geriye dönüş mekanizması diğer dalları denemek için devreye girer. Geriye dönüş mekanizması bir KSP probleminin çözümü için temel algoritmadır (Rossi ve diğerleri, 2006). Geriye dönüş algoritması bir çözümün olup olmadığını veya optimal olup olmadığını garanti eden tam bir algoritmadır.

Geriye dönüş algoritmaları dal oluşturmak için çeşitli arama stratejileri kullanırlar. Arama stratejileri sonraki düğümün nasıl seçileceğinin bir yoludur. Aşağıda bu amaçla kullanılan arama stratejileri kısaca açıklanmıştır (IBM, 2013b).

- i. Öncelikle derinlik (depth first) strateji: Bu stratejide arama en alt seviye düğümden başlar. O anki dal ile ilgili tüm çözümler elde edildikten sonra, diğer dallardaki çözümler araştırılır.

- ii. Çok noktalı (multi-point) strateji: Bu arama stratejisi çözüm uzayının farklı noktalarını araştırmak için kullanılır.
- iii. Yeniden başlatma (restart) stratejisi: Bu stratejide belirli bir hata değerine ulaşılmca, arama daha iyi çözümlere ulaşmak için tekrar başlatılır.
- iv. Otomatik arama stratejisi: Arama esnasında çözüm için yukarıdakilerden en uygun arama stratejisine karar verilir ve uygulanır. Genellikle arama esnasında yeniden başlatma stratejisi kullanılır.

Bu çalışmada ILOG OPL CP Optimizer yazılımının varsayılan olarak kabul ettiği, otomatik arama stratejisi kullanılmıştır.

Kısıt türetme ve çözüm kümesi azaltma

Kısıt türetme tutarsız değerlerin değişkenin çözüm kümesinden çıkarılması işlemidir. Bir değişkenin çözüm kümesi değişir değişmez, bu değişken ile ilgili kısıtlar türetilir. Daha sonra çözüm kümesi azaltma kısıtları sağlamayan atanmamış değişken değerlerinin çözüm kümesinden çıkarılmasını sağlar. Böylece her bir geriye dönüş iterasyonunda tutarlı bir çözüm elde edilir. Kısıt türetme ve çözüm kümesi azaltma ile ilgili çeşitli problemlere uygulanmış örnekler ve detaylı bilgi için Dechter (2013: 1-20) ve Puget ve Lustig (2001) incelenebilir. Bu tez çalışması MHDP ile ilgili olduğu için örnek bir MHDP üzerinden kısıt türetme ve çözüm kümesi azaltma anlatılacaktır.

Örneğin görev 2 ve 5 sırasıyla çözüm kümesi aralıkları $D_2 = [4,7]$, $D_5 = [2,5]$ ve görevlerin atandığı istasyon numaralarını gösteren iki karar değişkenine x_2 ve x_5 sahip olan iki görev olsun. Bu iki görev arasında görev 2'nin görev 5'ten önce yapılması gerektiği şeklinde bir öncelik ilişkisi bulunsun. Bu durum kısıt olarak $x_2 \leq x_5$ şeklinde ifade edilirse ikinci görevin atandığı istasyon numarası her zaman beşinci görevinkinden düşük olmalı ki aynı zamanda ikinci görev beşinci görevden önce yapılmış olsun. Bu öncelik kısıtı nedeniyle x_5 değişkeninin değeri x_2 değişkeninkinden büyük olmalıdır. O halde $x_5 = 2$ ve $x_5 = 3$ hiç bir şekilde tutarlı bir çözüm oluşturmayacağından beşinci görevin çözüm kümesinden çıkarılır. Böylece $D_5 = [4,5]$ halini alır ki bu durum arama ağacında daha az dalın aranması anlamına gelir. Bu süreç aralarında bu tür öncelik ilişkisi olan diğer tüm karar değişkenlerinin çözüm kümelerinde de gerçekleştirilir. Bu sayede

kısıt türetme ve çözüm kümesi azaltma algoritmaları çözüm etkinliği ve süresi üzerinde önemli bir rol oynar.

Literatürde KP problemlerinin kısıt türetme algoritması olarak kullandığı birkaç teknik vardır. Bu tekniklerden bazıları ileriye doğru kontrol (forward checking), ark tutarlılığı (arc consistency), yol tutarlılığı (path consistency), k-tutarlılık (k-consistency) olarak verilebilir. Bu teknikler hakkında detaylı bilgi için temel kısıt programlama kitaplarına başvurulabilir (Apt, 2003: 54-80; Dechter, 2003: 1-20).

Kısıt optimizasyonu problemleri

KSP uygun bir çözüm bulmak için kullanılırken, KOP önceden tanımlı bir amaç fonksiyonunun kullanılmasına izin verir. Herhangi bir A çözümü ile ilgili amaç fonksiyonu maksimizasyon veya minimizasyon şeklinde f olarak tanımlanabilir.

KP genellikle doğrusal programlama gibi amaç fonksiyonu için bir alt sınır hesabı yapmadığı için KOP'yi çözemez. Bu yüzden KP içerisinde KOP'yi çözebilmek için iki metot geliştirilmiştir. İlk metotta, standart arama algoritması ile KSP için bir çözüm bulunur. Sonra bulunan bu çözüm amaç fonksiyonunda yerine yazılıp yeni bir kısıt üretilir. Bu kısıt modele eklenir ve elde edilen yeni KSP çözülür. Arama devam ettiği sürece her seferinde daha iyi amaca sahip bir çözüm elde edilmiş olur. Eğer aramanın herhangi bir adımında uygun bir çözüm üretilemezse algoritma durdurulur.

KOP'yi çözmek için kullanılan diğer metot ise dichotomic aramadır. Bu arama ile amaç fonksiyonu için bir alt sınır L ve üst sınır U hesaplanmaya çalışılmıştır. Dichotomic arama bu iki sınırı kullanarak $M = (U + L) / 2$ yeni bir orta değer hesaplar. Daha sonra $f < M$ şeklinde orijinal modele yeni bir kısıt ekleyerek elde edilen yeni KSP çözülür. Bu şekilde yeni uygun çözümler elde edildikçe bu orta değer güncellenir. Eğer uygun olmayan bir çözüm elde edilirse, alt sınır güncellenir ve bu arama tekrar edilir.

2.3.2. Karışık tamsayılı programlama ve kısıt programlama karşılaştırması

KP ve karışık tamsayılı programlama (KTP) kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümü için farklı yaklaşımlar kullanarak çözüm üretmeye çalışan iki metottur. Puget ve

Lustig (2001) KP ve KTP'yi üç farklı boyut açısından karşılaştırmıştır: modelleme yeteneği, düğüm işleme ve arama stratejisi. Modelleme kavramları olarak her iki metot da şunları içerir: karar değişkenleri, kısıtlar, amaç fonksiyonu ve arama ağacı. Temelde arama stratejileri iki yöntem için de benzer olsa da, özellikle düğüm işleme açısından iki metot farklılıklar gösterir.

Lustig ve Puget (2013) KP'nin KTP'den temel iki durumda farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. İlki, KTP arama uzayını karar değişkenlerinin kesirli olmayan değerleri ile bölerken, KP arama uzayını herhangi bir kısıt setini kullanarak ürettiği noktalar ile bölmektedir. Alt optimal çözümleri elemek için, o anki aramada bulunan her bir düğüm için KTP bir alt sınır hesaplar. KP ise uygun olmayan çözümlerin elenmesi ile ilgilenir. İkinci durum dallanma esnasında değişken seçiminde ortaya çıkar. KP probleme özgü dallanma stratejisi belirlenmesine olanak verir. KTP de ise geleneksel dal sınır tekniği kullanılır. Probleme özgü yeni arama stratejilerinin geliştirilmesinde KP ve KTP'nin birleştirilmesi ile elde edilecek yeni modeller literatürde ilgi çekici konular arasındadır.

KP, KTP'ye göre bazı avantajlara sahiptir. KP'nin güçlü bir özelliği uygulama dilidir. KP'de özel programlanmış kısıtlar, mantıksal kısıtlar ve doğrusal olmayan kısıtlar kolaylıkla ifade edilebilir. Buna karşın KTP sadece doğrusallaştırılmış mantıksal kısıtlar veya karesel konveks kısıtları destekler. Bu avantajlarının yanı sıra, KP'nin en temel dezavantajları hafıza kullanımı ve değişken tanımlama olarak verilebilir. KP her bir değişken için ayrı çözüm kümesi tanımladığı için KTP'ye göre daha fazla hafıza ihtiyacı duyar. Ayrıca KP sadece kesikli karar değişkenlerini destekler (IBM, 2013a). Buna rağmen, KP birçok kombinatorial problem için KTP'ye alternatif bir yöntem olabilir. Bu çalışmada ise deterministik ve stokastik MHDP için önerilen modeller KP kullanılarak modellenmiş ve çözülmüştür.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması tez çalışmasında ele alınan temel problemler olan deterministik ve stokastik MHDP, performans değerlendirme modeli olan kuyruk ağlarının üretim sistemleri ve montaj hattı uygulamaları, çözüm yöntemi olarak kullanılan kısıt programlamanın üretim sistemleri ve montaj hattı uygulamaları kapsamında takip eden alt bölümlerde verilmiştir.

3.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

Salveson (1955) montaj hattı dengeleme problemlerini matematiksel olarak modelleyen ilk çalışmayı yapmıştır. Bu çalışmada Tip 1 MHDP için bir doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Modelde öncelik ilişkileri ve atama kısıtları ile birlikte istasyon sayısının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Günümüze kadar bu ilk çalışmanın üzerine farklı MHDP türleri (çok modelli, u-tipi, paralel, çift taraflı, stokastik gibi) için çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar problem tiplerindeki farklılaşma yanında çözüm yöntemleri çeşitliliğini de getirmiştir. MHDP hakkında problem türleri ve çözüm yöntemleri hakkında daha ayrıntılı bilgilere ulaşmak için, Baybars (1986), Erel ve Sarin (1998), Becker ve Scholl (2006), Boysen, Flidner ve Scholl (2007), Battaia ve Dolgui (2013) ve Sivasankaran ve Shahabudeen (2014) tarafından yapılan literatür çalışmalarına başvurulabilir. Yazarlar, çalışmalarında montaj hattının genel sınıflandırmasını da yapmışlardır. Bu sınıflandırma Bölüm 2.1.2’de verilen sınıflandırma ile benzer şekilde düzenlenmiştir (Bkz. Şekil 2.2).

Literatürde MHDP için amaç fonksiyonunun genellikle istasyon sayısı en küçüklenmesi olarak ele alındığı görülmektedir. Ancak talep yapısının değişmesi, stokastik unsurların ortaya çıkması ve gelişen teknoloji ile birlikte hattın yeniden dengelenmesi gerekli olabilmektedir. Ayrıca bu durumlar hatta çeşitli atama kısıtlarının da ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Boysen ve diğerleri, 2007). Yeniden dengeleme çalışmaları tip-2 problem sınıfında yer alan ve amaç fonksiyonu olarak çevrim zamanı en küçüklenmesini kullanan problemlerdir. Son zamanlarda Sivasankaran ve Shahabudeen (2014) tarafından yapılan çalışmada da vurgulandığı üzere hemen her MHDP türü için tip-2 problemlerinin literatürde daha az ele alındığı söylenebilir. Bu sebeple literatür çalışmasında tez

çalışmasının temel amaçlarından olan hat tasarım probleminin deterministik ve stokastik görev zamanlarına sahip olduğu problemler takip eden bölümlerde ayrı ayrı incelenmiştir.

3.1.1. Deterministik montaj hattı dengeleme problemleri

Deterministik tip-2 problemleri hattın yeniden dengelenmesi durumunda ortaya çıkan ve atama kısıtlarını da içerebilen problemlerdir. İleriki bölümlerde ele alınacak olan atama kısıtlı tip-2 MHDP'ye temel oluşturacak literatür çalışmaları atama kısıtları dikkate alınmaksızın bu bölümde ele alınmıştır. Atama kısıtlarının da dikkate alındığı çalışmalar Bölüm 4.1'de verilmiştir.

Tez çalışmasında tip-2 MHDP için yeni bir programlama tekniği olan kısıt programlama modeli geliştirilecektir. Bu nedenle literatür çalışması tip-2 MHDP'nin çözümü için geliştirilen çözüm yaklaşımlarına göre sınıflandırılmıştır. Genel olarak literatür incelendiğinde tip-2 MHDP'nin çözümü için matematiksel modelleme, dal sınır algoritması gibi kesin yöntemlerin, probleme özgü çeşitli sezgisel yaklaşımların ve meta-sezgisel çözüm tekniklerinin kullanıldığı görülmektedir. Tip-2 deterministik MHDP için literatür çalışmaları Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Tip-2 MHDP'yi ilk olarak inceleyen çalışma Helgeson ve Bernie (1961)'nin çalışmasıdır. Çalışmada pozisyon ağırlığı tekniğine dayalı iterasyon temelli bir sezgisel prosedür önerilmiştir. Tip-1 problemi iteratif olarak çözülerek tip-2 problemine çözüm aranmıştır. Bu çalışmadan sonra sezgisel çözüm önerileri giderek artmıştır. Mansoor (1964), sıralanmış pozisyon ağırlığı yöntemini geliştirerek yeni bir prosedür önermiştir. Pozisyon ağırlıkları görevin kendi süresi ile kendinden sonra gelen tüm görevlerin sürelerinin toplamı olarak kabul edilmiştir. Tüm görevler için belirlenen pozisyon ağırlıkları artan sırada sıralanıp çevrim zamanı ve öncelik ilişkilerine de dikkat edilerek görevler istasyonlara atanır. Bütün görevler belirlenen istasyonlara atanana kadar prosedür devam ettirilir. Eğer görevler önceden verilen istasyon sayısında dengelenmez ise, çevrim süresi bir artırılarak işlem tekrarlanır. Pozisyon ağırlığı metoduna benzer bir sezgisel prosedürü D. Rao (1971) çalışmasında önermiştir. Prosedürde, istasyonlardaki toplam boş zamanlar hesaplanıp, öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı kısıtını sağlayacak şekilde görev atamaları yapıldıkça bu zamanları güncelleyerek denge sağlanmaya çalışılmıştır. Eğer hiçbir uygun çözüm bulunmazsa çevrim zamanı bir artırılarak prosedür devam ettirilmiştir. Görev

sürelerinin deterministik ve stokastik olduğu durumlara göre prosedür test edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çizelge 3.1. Deterministik MHDP literatür çalışmaları

	Yayın	Amaç	Çözüm Yöntemi	Açıklama
Sezgisel Yöntem Çalışmaları	Helgeson ve Bernie (1961)	c	Posizyon Ağırlığı Yöntemi	
	Mansoor (1964)	c	Geliştirilmiş Pozisyon Ağırlığı Yöntemi	
	D. Rao (1971)	c	Posizyon Ağırlığı Yöntemi	Toplam boş zamana göre
	Scholl ve Vob (1996)	m, c	Tabu Arama	Çift Yönlü Dinamik Öncelik Kuralı
	Liu, Ong ve Huang (2003)	c	Çift Yönlü Arama prosedürü (ÇYAP) Büyük Görevler Öncelikli ÇYAP	Trade-Transfer
	Nearchou (2008)	c, DI ve c, DG	Türevsel Evrim Sezgiseli	
	Nourmohammadia ve Zandieh (2011)	c, DI	Türevsel Evrim Sezgiseli	TOPSIS entegreli
Matematiksel Model Çalışmaları	Wee ve Magazine (1981)	$c, \bar{UO}$	Dal-Sınır Algoritması	
	Hackman, Magazine ve Wee (1989)	$c, \bar{UO}$	Dal-Sınır + Sezgisel Prosedür	
	Klein ve Scholl (1996)	c	Dal-Sınır Algoritması	
	Uğurdağ, Rachamadugu ve Papachristou (1997)	$m, c, \bar{IY}$	İki Aşamalı Simplex	
	Pastor ve Ferrer (2009)	m, c	Matematiksel Programlama	Üst Sınır Belirleme
	Kilincici (2010)	c	Petri Ağları	
	Wei ve Chao (2011)	$m*c$	Alt ve Üst Sınır Geliştirme Tip E Problemi Sezgiseli	
Meta-Sezgisel Yöntem Çalışmaları	Rekiek, De Lit, Pellichero, Falkenauer ve Delchambre (1999)	c	Gruplanmış Genetik Algoritma	
	Carnahan, Noman ve Redfem (2001)	c	Genetik Algoritma	Sıralama Sezgiseli
	Gao, Sun, Wang ve Gen (2009)	c	Genetik Algoritma	Yerel Arama
	Kim, Song ve Kim (2009)	c	Matematiksel Model Genetik Algoritma	Çift Taraflı Montaj Hattı
	Seyed-Alagheband, Ghomi ve Zandieh (2011)	c	Tavlama Benzetimi	Taguchi Deney Tasarımı

Scholl ve Vob (1996), hem tip-1 hem de tip-2 probleminin çözümü için bir sezgisel çözüm prosedürü geliştirmişlerdir. Tip-1 problemi çift yönlü dinamik öncelik kuralları kullanılarak çözülmüştür. Tip-2 problemi için ise bu arama metodu tekrarlı olarak

kullanılarak çözüm aranmıştır. Prosedürün arama stratejini geliştirmek için tabu arama yaklaşımı prosedür ile birleştirilmiştir. Sayısal deneyler ile yeni yaklaşımın etkinliği gösterilmiştir. Liu ve diğerleri (2003), tip-2 probleminin çözümü için iki farklı sezgisel algoritma önermişlerdir. Bu sezgisellerden biri çift yönlü arama prosedürü diğeri büyük görevler öncelikli çift yönlü arama prosedürüdür. Ayrıca bu prosedürlerin Trade-Transfer komşu üretme sezgiseli ile birleştirilmesiyle yeni sezgiseller üretilmiştir. Önerilen sezgiseller test problemleri ile test edilmiş ve Trade-Transfer komşu üretme sezgiseli ile bütünleşik büyük görev öncelikli çift yönlü arama prosedürünün en etkin sezgisel olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmalarda problemde genellikle tek amaç fonksiyonu dikkate alınmıştır. Ancak son çalışmalarda çok amaçlı çözüm yaklaşımları yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak Nearchou (2008) çalışması verilebilir. Çalışmada çok amaçlı tip-2 problemi için bir sezgisel prosedür önerilmiştir. Çalışmada iki ayrı çift kriterli amaç fonksiyonu dikkate alınmıştır. İlk amaç çevrim zamanının en küçüklenmesinin yanı sıra denge gecikmesinin en küçüklenmesini de sağlamaktadır. İkinci çift kriterli amaç ise çevrim zamanı ile birlikte düzgünlük indeksinin de en küçüklenmesidir. Türevsel evrim sezgiseline dayalı bir çok amaçlı sezgisel geliştirilmiştir. Çok kriterli amaçlar her bir amaca birer ağırlık verilerek değerlendirilmiştir. Geliştirilen model test problemleri ile değerlendirilmiştir. Nourmohammadia ve Zandieh (2011), çok amaçlı tip-2 probleminin çözümü için türevsel evrim algoritması önermişlerdir. Dikkate alınan amaçlar çevrim zamanı ve düzgünlük indeksinin en küçüklenmesi olarak belirlenmiştir. Yeni çözümlerin üretilmesinde Pareto baskınlık analizi ve TOPSIS yöntemine dayalı yeni bir geliştirme şeması sunulmuştur. Geliştirilen algoritmanın parametrelerinin belirlenmesi için Taguchi deney tasarımı analizi yapılmış ve modelin etkinliği literatürdeki test problemleri ile gösterilmiştir.

Matematiksel modeller problemin daha iyi anlaşılması ve optimum çözümlerin belirlenmesi için büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple tip-2 problemleri için literatürde önerilen matematiksel modellerin çözümünde kullanılacak çeşitli kesin yöntemlere de rastlamak mümkündür. Problemin çözümü için ilk kesin yöntem denemesi Wee ve Magazine (1981) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tip-2 probleminin çözümü için bir dal sınır algoritması geliştirilmiştir. Algoritma dört farklı arama prosedürü içermektedir. Bunlar alt sınır, üst sınır, ikili arama ve Fibonacci arama prosedürleridir. Üretim oranını en büyüklemeyi amaçlayan algoritmada tip-1 probleminin çözümünden elde edilen sonuçlardan da faydalanılmaktadır. Hackman ve diğerleri (1989), Wee ve

Magazine (1981)'de geliştirilen dal sınır algoritmasında arama uzayını daraltmak için yeni sezgisel metotlar geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritma 53 farklı test problemi için tip-1 ve tip-2 problemini çözmek üzere test edilmiştir. Başka bir dal sınır algoritması denemesi Klein ve Scholl (1996) tarafından yapılmıştır. Geliştirilen dal sınır prosedürü yeni bir birerleme tekniği olan yerel alt sınır metoduna dayanmaktadır. Bu alt sınır prosedürü dallanma ve baskınlık kuralları ile desteklenerek algoritmanın etkinliği artırılmaya çalışılmıştır. Geliştirilen metoda SALOME-2 ismi verilmiştir. Uğurdağ ve diğerleri (1997), tip-2 probleminin çözümü için iki aşamalı Simplex metodu benzeri bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritmanın ilk aşamasında sezgisel bir yöntemle başlangıç çözümü elde edilmektedir. Algoritmanın ikinci aşaması ise iki evreden oluşmaktadır. Birinci evrede probleme ait ilk simplex tablosu elde edilir. İkinci evrede ise ilk amaç çevrim zamanı en küçüklemesi ikinci amaç da iş yükü varyansının en küçüklenmesi olacak şekilde simplex benzeri bir metotla başlangıç çözümü geliştirilir. Pastor ve Ferrer (2009), tip-1 ve tip-2 problemleri için yeni birer matematiksel model önermişlerdir. Geliştirilen modellerin ana fikri istasyon sayısı ve çevrim zamanı için etkin bir üst sınır belirlemektir. Geliştirilen modeller optimum ve uygun çözüme ulaşma kabiliyetine göre kıyaslanmıştır. Tip-2 problemi için geliştirilen SALBP-2-n modelinin daha etkin olduğu görülmüştür. Kilinceci (2010) tip-2 MHDP için petri ağları temelli bir çözüm yaklaşımı sunmuştur. Petri ağlarının bir özeliği olarak, erişilebilirlik analizi ile görevlerin istasyonlara atanması sağlanmıştır. Eğer çözüm metodunda verilen bir çevrim zamanı için uygun olmayan çözüm elde edilirse, çevrim zamanı artırılarak uygun çözüm bulunana kadar prosedür çalıştırılır. İleri, geri ve çift yönlü arama prosedürleri ile önerilen sezgisel geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım literatürde yer alan test problemleri ile değerlendirilerek, problem için daha önce yapılan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Wei ve Chao (2011), tip-1 ve tip-2 problemlerini birleştirerek tip-E problemine çözüm aramışlardır. Tip-2 probleminin çözümünde Pastor ve Ferrer (2009) tarafından geliştirilen modeller dikkate alınarak bir çözüm prosedürü geliştirilmiştir. Çözüm prosedürü istasyon sayısı için belirlenen bir alt ve üst sınır aralığında her seferinde tip-2 problemini çözerken, istasyon sayısı üst sınır değerinden küçük olduğu sürece bu prosedür tekrar edilir. Etkinlik değeri ise istasyon sayısı ile çevrim zamanının çarpımı olarak belirlenmiştir. Model bilgisayar üretimi için verilen bir öncelik ilişkisine sahip örnek problem ve literatürdeki test problemleri ile test edilmiştir.

Sezgisel ve matematiksel model yaklaşımları özellikle büyük boyutlu veya gerçek hayat problemlerinde etkili iyi çözümlerin bulunmasında yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple problemin çözümü için meta-sezgisel çözüm yöntemleri kullanılmıştır. Meta-sezgisel çalışmalarına örnek olarak Rekiek ve diğerleri (1999) gösterilebilir. Yazarlar eşit yığın problemini tip-2 MHDP'nin çözümü için uygulamışlardır. Farklı istasyonlardaki işlem zamanlarının neredeyse eşit kabul edildiğini varsaymışlardır. Bu varsayım eşit yığın probleminden kaynaklanmaktadır. Problemin çözümü için gruplayıcı genetik algoritma tabanlı bir çözüm prosedürü önermişlerdir. Carnahan ve diğerleri (2001), görevlerin yapılması için gerekli fiziksel yetenekleri de göz önünde bulundurarak tip-2 problemini incelemişlerdir. Problemin çözümü için sıralama sezgiseli, genetik algoritma ve problem uzayına özel bir genetik algoritma olmak üzere üç farklı sezgisel metot geliştirilmiştir. Problemin amacı en büyük fiziksel ihtiyacı karşılayacak şekilde çevrim zamanını en küçükleme. Önerilen sezgiseller literatürde yer alan test problemleri ile test edilmiş ve problem uzayına özel genetik algoritmanın diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Gao ve diğerleri (2009), robotik bir montaj hattında hat üretkenliğini artırmak için yeniden dengeleme üzerinde çalışmışlardır. Görevler bir istasyona atanmak zorunda iken her bir istasyon da atanan görevlerin yerine getirilmesi için bir robota ihtiyaç duymaktadır. Problemin çözümü için yerel arama ile hibrid edilmiş yeni bir genetik algoritma önerilmiştir. Komşuluk mekanizması için beş farklı yerel arama prosedürü kullanılmıştır. Algoritmanın etkinliği literatürdeki problemler ile test edilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca literatürde Tip-2 problemleri sadece geleneksel düz hat tasarımı için dikkate alınmamıştır. Örneğin çift taraflı tip-2 problemleri için Kim ve diğerleri (2009) yeni bir matematiksel model ve genetik algoritma önermişlerdir. Matematiksel model çift taraflı MHDP için geliştirilen ilk matematiksel model niteliğindedir. Modelin çözümünde kullanılan genetik algoritma yaklaşımına yerel evrim prosedürü eklenerek arama etkinliği artırılmıştır. Geliştirilen algoritmanın etkinliği test problemleri ile değerlendirilmiştir. Tip-2 problemleri gerçek hayatta karşılaşılan sıra bağımlı hazırlık zamanları gibi durumlar eklenerek de ele alınmıştır. Seyed-Alagheband ve diğerleri (2011), sıra bağımlı hazırlık zamanlarının olduğu genel tip-2 problemini ele almışlardır. Geliştirilen model Andres, Miralles ve Pastor (2008) tarafından tip-1 problemleri için geliştirilen matematiksel modelin tip-2 problemleri için uyarlamasıdır. Problemin çözümü için Taguchi metodu ile parametreleri ayarlanmış bir tavlama benzetimi algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritma literatürdeki test problemleri ile test edilmiştir.

Bu çalışmaların dışında düz hat tasarımına sahip tip-2 problemlerinin yanı sıra U-tipi, paralel, çok ürünlü ve diğer tip-2 MHDP için Bölüm 3.1’de bahsedilen literatür araştırması çalışmaları incelenebilir. Tez konusunun kapsamı düz hat tip-2 problemleri olduğu için bu çalışmaların detayları verilmemiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde MHDP için geleneksel çözüm yöntemlerinin kullanıldığı, problemin çözümü için daha yenilikçi modelleme veya çözüm tekniklerinin henüz dikkate alınmadığı görülmüştür. Bu yenilikçi modelleme tekniklerinden biri olan kısıt programlama literatürde birçok kombinatoryal problemin çözümü için kullanılmasına rağmen MHDP’nin çözümü için çok fazla kullanılmamıştır. Bu tez çalışmasında detayları ilerleyen bölümlerde verilecek olan, atama kısıtlarını da içeren tip-2 MHDP’nin çözümü için yeni bir kısıt programlama modeli önerilmiştir. Modelin etkinliği çeşitli atama kısıtları durumları için ayrı ayrı incelenerek gösterilmiştir.

3.1.2. Stokastik montaj hattı dengeleme problemleri

Montaj hatlarında Tip-2 problemlerinin ortaya çıkma nedenlerinden biri de stokastikliklerdir. Montaj hatlarında stokastiklik kendini çeşitli faktörler üzerinde gösterebilir. Bunlar görev zamanı, talep, ekipman arızaları, malzeme dağıtımı ve arızalı ürünlerin stokastikliği olarak söylenebilir. Bu faktörlerden herhangi birinde meydana gelen değişim hattın yeniden dengelenmesini gerektireceğinden tip-2 probleminin dikkate alınması gerekecektir. Literatür çalışmasının bu bölümünde tez çalışmasının temel konularından olan stokastik durumların söz konusu olduğu tip-2 MHDP’leri incelenecektir. İlgili literatür çalışmaları Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.

Literatürde stokastik MHDP’ye maliyet en küçüklenmesi, iş yükünün düzgün dağıtılması, çevrim zamanının belirli bir olasılıkla geçilememesi, çevrim zamanı en küçüklenmesi ve çok amaçlı yaklaşımlar olarak çeşitli amaç fonksiyonları dikkate alınarak çözüm önerileri sunulmuştur. Stokastik MHDP için yapılan ilk çalışmalar belirsizlikten doğan iş gücü ve işlerin tamamlanamama maliyetlerinin en küçüklenmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Kottas ve Lau (1973), stokastik MHD için maliyet fonksiyonunu en küçükleyen bir sezgisel geliştirmişlerdir. Görev zamanlarının normal dağılım kabul edildiği bir öncelik diyagramında, öncelik ilişkilerine göre atanabilecek işler listesi belirlenir ve görevler bu

listeden seçilerek istasyonlara atanır. Her bir yeni atamada liste güncellenir. Atama sonucunda tamamlanamayan bir iş tespit edilirse, hattın sonunda tamamlanır. Bir görevin beklenen işçilik gelirinin, tamamlanmama maliyetinden fazla olması durumunda görev marjinal tercih listesine eklenir. Atanabilecek işler listesi ile marjinal tercih listesi dikkate alınarak görev ataması tüm görevler atanana kadar devam ettirilir.

Çizelge 3.2. Stokastik MHDP literatür çalışmaları

	Yayın	Amaç	Çözüm Yöntemi	Açıklama
Maliyet Amaçlı Çalışmalar	Kottas ve Lau (1973)	Toplam Mly.	Sezgisel	Normal Dağılım
	Kottas ve Lau (1976)	Tamamlanmama Mly.	Sezgisel	
	Kottas ve Lau (1981)	Tamamlanmama Mly.	Sezgisel	3 farklı seçim stratejisi
	Silverman ve Carter (1986)	İşlem Mly.	COMSOAL	Çift Yönlü Dinamik Öncelik Kuralı
	Shin (1990)	Toplam Mly.	Deterministik Zamanlı Atama Prosedürü	Toplam Mly.=Tamamlanmama Mly. + İş gücü Mly.
	Sarin, Erel ve Dar-El (1999)	Toplam Mly.	Dinamik Programlama Dal-Sınır	
	Gökçen ve Baykoç (1999)	Toplam Mly.	Simülasyon	
Çevrim Zamanı Aşma Olasılığı	Modie ve Young (1965)	Olasılık	Sezgisel	1. Aşama: Dengeleme 2. Aşama: İşlerin Bölünmesi
	Raouf ve Tsui (1982)	Olasılık	Sezgisel	
	Suresh ve Sahu (1994)	DI, Hat Durma Olasılığı	Tavlama Benzetimi	
Düzensizlik İndeksi ve İş Yüklü Dağılımı	Suresh ve Sahu (1994)	DI, Hat Durma Olasılığı	Tavlama Benzetimi	
	Liu, Ong ve Huang (2005)	c	Sezgisel	1. İstasyonlara görev ataması 2. İş yükünün düzleştirilmesi 3. Çevrim zamanının azaltılması
	Zacharia ve Nearchou (2012)	Bulanık c + İY Bulanık c + Bulanık DG	Genetik Algoritma	Bulanık görev zamanları
Çevrim Zamanı	Ağpak ve Gökçen (2007)	c	Matematiksel Programlama	Şans Kısıdı + U-tipi
	Hazır ve Dolgui (2013)	c	Benders Ayırıştırma	Robust Matematiksel Programlama
Çok Amaçlı	Nkasu ve Leung (1995)	m, c, DG	COMSOAL Simülasyon	
	Ayazi, Hajizadehb, Nooshabadic, Jalaiea ve Moradi (2011)	m, c, İY	Genetik Algoritma	Matematiksel Model
	Zacharia ve Nearchou (2012)	Bulanık c + İY Bulanık c + Bulanık DG	Genetik Algoritma	Bulanık görev zamanları
	Hamta, Ghomi, Jolai ve Shirazi (2013)	c, Mly., DI	Değişken Komşu Arama Sıra bağımlı hazırlık zamanı Parçacık Sürüşü Algoritması	Öğrenme etkisi

Çizelge 3.2. (devam) Stokastik MHDP literatür çalışmaları

	Yayın	Amaç	Çözüm Yöntemi	Açıklama
Simülasyon	Mendes, Ramos, Simaria ve Vilarinho (2005)	Toplam Akış Zamanı İstasyon Kullanım Oranı	Tavlama Benzetimi Simülasyon	
	Su ve Lu (2007)	İY	Genetik Algoritma Simülasyon	
	Kuo ve Yang (2011)	Üretim Süresi Bekleme Zamanı	Parçacık Sürüşü Simülasyon	
	Tiacci (2012)	Çıktı Hızı	Simülasyon	Paralel istasyon Sınırlı Bekleme yeri Çok ürünli
	Tiacci (2015)	Çıktı Hızı	Genetik Algoritma Simülasyon	Paralel istasyon Sınırlı Bekleme yeri Çok ürünli

İlk çalışmasından farklı olarak Kottas ve Lau (1976), tip-2 problemleri için beklenen tamamlanmama maliyetini en küçükleyecek yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemin farklı tarafı tamamlanamayan işlerin tüm kombinasyonları, mevcut olasılıkları ve maliyetlerinin hesaplanmasıdır. Bu maliyetler göz önünde bulundurularak en iyi kombinasyon seçilir. Kottas ve Lau (1981), daha önceki çalışmalarını da göz önünde bulundurarak geliştirilmiş yeni bir sezgisel metot sunmuşlardır. Sezgisel metotta rassal seçim, en yüksek tamamlanmama maliyeti, en düşük tamamlanmama maliyeti olarak farklı seçim stratejileri için farklı hat dengeleri elde edilerek değerlendirilmiş ve en düşük maliyetli denge en iyi çözüm olarak sunulmuştur. Silverman ve Carter (1986), görevlerin istasyon zamanının izin verdiği sürede yapılamaması durumunda tüm hattın durdurularak görevin tamamlandığı stokastik hatları ele almışlardır. Stokastik görevlerden dolayı ortaya çıkan işlem maliyetini en küçükleyecek bir metot önerilmiştir. COMSOAL metoduna benzer bir metotla görevler istasyonlara atanarak en küçük maliyetli denge oluşturulmaya çalışılmıştır. Shin (1990), Kottas ve Lau (1973)'ün maliyet fonksiyonuna benzer bir beklenen toplam maliyeti en küçükleyecek bir sezgisel metot önermişlerdir. Maliyet fonksiyonu toplam beklenen tamamlanmama maliyeti ile toplam işçilik maliyetinden oluşur. Tamamlanmayan işler hattın sonunda tamamlanır ve görev zamanları normal dağılım varsayılır. Görevlerin atanmasında geliştirilen sezgisel ise deterministik zamanlı atama prosedürüne dayanır. Prosedür çevrim zamanında ulaşılabilecek en alt sınıra ulaşıncaya kadar durur. Sarin ve diğerleri (1999), tip-2 stokastik MHDP için başlangıç çözümünün dinamik programlama ile bulunduğu, düğüm azaltma yöntemi ile başlangıç çözümünün geliştirilerek birerlemeye dayalı bir dal sınır algoritması geliştirmişlerdir.

Amaç fonksiyonu toplam işçilik ve tamamlanma maliyeti olarak belirlenmiştir. Gökçen ve Baykoç (1999), beklenen çevrim zamanı içerisinde tamamlanamayan işlerin Kottas ve Lau (1973) çalışmasında alınan hattın sonunda tamamlanması stratejisinin aksine hattın dışında seyyar hareket eden bir istasyon vasıtasıyla tamamlanması stratejisini incelemişlerdir. Toplam beklenen maliyeti en küçükleyecek hat tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Performans ölçümü için elde edilen her bir hat tasarımının simülasyonu yapılmıştır.

Stokastik MHDP için dikkate alınan bir diğer amaç fonksiyonu belirsizlikten dolayı ortaya çıkan istasyon sürelerinin çevrim zamanından büyük olma olasılıklarının belirli sınırlar içerisinde gerçekleştirilmesidir. Stokastik MHDP için yapılan ilk çalışmalardan olan Modie ve Young (1965) bu olasılığın önceden belirli bir güven aralığını sağlayacak şekilde atamalarının yapılmasını sağlamışlardır. Bunun için iki aşamalı bir sezgisel prosedür geliştirmişlerdir. Önerilen prosedürün ilk aşamasında en büyük görev zamanı kuralına göre bir denge elde ettikten sonra ikinci aşamada istasyonlardaki boş zamanı azaltmak için işlerin bölünmesi yoluna gitmişlerdir. Görev sürelerinin normal dağılım olduğu varsayılır ve güven aralığı içinde tamamlanmayan görevler dikkate alınmazlar. Raouf ve Tsui (1982), görevlerin değişkenlik katsayılarını göz önünde bulundurarak bir sezgisel geliştirmişlerdir. Sezgiselin temel dayanağı değişkenlik katsayılarına sahip bir grup görevin bir istasyona atanması ile o istasyonun değişkenlik katsayısının azalacağıdır. Farklı olasılık dağılımlarına sahip görevlerden öncelik ilişkilerine göre atanmamış hiçbir önceliği olmayan işler atanabilecek görevler listesine kaydedilir. Bu görevlerden istasyon zamanının çevrim zamanını geçme olasılığı önceden belirli bir olasılığı geçmeyen görev seçilir. Brady ve Drury (1969)'nin teoremine göre istasyona atanacak işlerin alt kümesi atanabilecek işler kümesinden seçilir. Değişkenlik katsayısı düşük işlere öncelik verilerek görevler istasyonlara atanır. Suresh ve Sahu (1994), tavlama benzetimi algoritmasını kullanarak düzgünlük indeksi ve hattın durma olasılığını en iyileyecek hat dengesini araştırmışlardır. Herhangi bir çözüme ulaşıldığında komşu çözümler istasyonlar arasında mümkün olacak tüm değişimler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Yüksek görev sayısına sahip problemlerin çözümleri için etkili bir algoritma önerilmeye çalışılmıştır.

İş yükünün düzgün dağıtılmasını ya da düzgünlük indeksinin en küçüklenmesini amaç fonksiyonu olarak ele alan çalışmalarda görevlerin istasyon iş yükleri mümkün olduğunca eşit olacak şekilde dağıtılması hedeflenmektedir. Suresh ve Sahu (1994) tavlama benzetimi algoritması kullanarak ele aldığı problemde hattın durma olasılığını en iyilerken düzgünlük

indeksinin en küçüklenmesini de amaçlamıştır. Liu ve diğeleri (2005), stokastik MHDP'nin çözümü için üç aşamadan oluşan bir sezgisel çözüm prosedürü önermişlerdir. İlk aşamada ileri ve geri yönlü olarak görevler istasyonlara atanır. İkinci aşamada istasyonlar arasında görev değişimleri ile iş yükünün düzgün dağıtılması sağlanır. Üçüncü aşamada çevrim zamanı için belirlenen üst sınır güven seviyesini sağlayana kadar adım adım düşülür ve en düşük çevrim zamanı elde edilir. Zacharia ve Nearchou (2012), tip-2 problemlerini görev zamanlarını herhangi bir olasılık dağılımı yerine bulanık sayılar olduğu durum için değerlendirmişlerdir. Görev zamanları üçgensel bulanık sayılar olarak ifade edilmiştir. İki farklı çift kriterli amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Birincisi bulanık çevrim zamanı ile iş yükü dağılımının bulanık düzgünlük indeksinin en küçüklenmesi, ikincisi bulanık çevrim zamanı ile bulanık denge gecikmesinin en küçüklenmesidir. Problemin çözümü için genetik algoritma yaklaşımı kullanılmış ve yaklaşım literatürdeki test problemleri ile test edilmiştir.

Literatürde geleneksel tip-2 MHDP'nin amaç fonksiyonu olan çevrim zamanının en küçüklenmesi için de çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda önemli olan bir dağılım ile (normal dağılım, düzgün dağılım gibi) ifade edilen görev zamanlarının deterministik bir parametre olan çevrim zamanı ile kıyaslanabilir bir duruma dönüştürülmesidir. Bu amaçla Ağpak ve Gökçen (2007) normal dağılıma sahip görev zamanlarını şans kısıtı yaklaşımı ile değerlendirerek matematiksel modeldeki zaman kısıtlarını deterministik hale dönüştürmeye çalışmışlardır. Çalışmada düz hat tasarımı dışında U-tipi hat tasarımını dikkate almışlardır. U tipi Stokastik tip-2 MHDP için şans kısıtı yaklaşımı ile bir matematiksel model önermişlerdir. Önerilen model iki farklı doğrusallaştırma tekniği kullanılarak doğrusal hale getirilmiştir. Bu teknikler yaklaşık doğrusal teknik ile tam doğrusal teknik olarak iki şekilde değerlendirilmiştir. Daha sonra stokastiklikten kaynaklanan güvenilirliğin artırılması için amaç programlama yaklaşımını önermişlerdir. Hazır ve Dolgui (2013), çevrim zamanının en küçüklenmesi problemi için iki yeni robust model önermişlerdir. Önerilen modeller için bir üst sınır prosedürü verilirken, modellerin çözümü için Benders ayrıştırma metoduna dayalı bir yöntem kullanılmıştır. Literatürdeki problemler ile çözüm metodu test edilmiştir.

Son zamanlarda literatürde tek amaçlı problemler yerine çok amaçlı problemlerin daha çok ele alındığı görülmektedir. Bu amaçlar yukarıda bahsedilen amaç fonksiyonlarının iki veya daha fazlasının birlikte değerlendirildiği yeni amaç fonksiyonlarıdır. Çok amaçlı

yaklaşımlara ilk örnek Nkasu ve Leung (1995) çalışması verilebilir. Çalışmada stokastik MHDP için COMSOAL tabanlı iki aşamadan oluşan bir sezgisel prosedür önermişlerdir. Birinci aşamada COMSOAL sezgiseli ile uygun çözümler üretilir, ikinci aşamada ise üretilen çözümler benzetim yolu ile değerlendirilerek performans değerleri tespit edilir. Performans değeri olarak istasyon sayısının, denge gecikmesinin ve çevrim zamanının en küçüklenmesi ya da bunların birleşiminden oluşan yeni bir performans ölçütü kullanılmıştır. Ayazi ve diğerleri (2011), problemin çözümü için çevrim süresi, istasyon sayısı ve iş yükü sapmalarının en küçüklenmesi için çok amaçlı bir genetik algoritma yaklaşımı sunmuşlardır. Ele alınan problem için bir karışık tamsayılı model geliştirilmiştir. Bir örnek problem ile önerilen model farklı amaçlar altında test edilmiştir. Zacharia ve Nearchou (2012) çalışmalarında bulanık çevrim zamanı ile iş yükü dağılımının bulanık düzgünlük indeksinin en küçüklenmesi ya da bulanık çevrim zamanı ile bulanık denge gecikmesinin en küçüklenmesi şeklinde iki farklı çok amaçlı bir problemi dikkate almışlardır. Hamta ve diğerleri (2013), sıra bağımlı hazırlık zamanlarının ve görevlerin yapılması sırasında öğrenme etkisinin dikkate alındığı esnek görev zamanlı MHDP'yi çalışmışlardır. Çevrim zamanı, toplam ekipman maliyeti ve düzgünlük indeksinin aynı anda en küçüklendiği bir çok amaçlı model önermişlerdir. Dikkate alınan kısıtların modele getirdiği aşırı yük sebebiyle özellikle büyük boyutlu problemlerin çözümü için parçacık sürüsü algoritması kullanılmıştır. Önerilen algoritma parçacık sürüsü algoritması ile değişken komşu arama algoritmalarının entegrasyonu ile elde edilmiştir. Literatürde yer alan test problemleri ile algoritma denenmiş ve problem için literatürde önerilmiş diğer çözüm yöntemleri ile karşılaştırılarak algoritmanın etkinliği gösterilmiştir.

Literatür çözüm yöntemi açısından incelendiğinde stokastik MHDP için çoğunlukla matematiksel modellerin, probleme özgü sezgisel veya meta-sezgisel algoritmaların geliştirildiği görülmektedir. Bunların yanı sıra stokastikliğin getirdiği durumları incelemek için simülasyondan faydalanan çalışmalar da mevcuttur. Simülasyonunun tek başına tüm hat konfigürasyonlarını değerlendirmek için kullanılmasının mümkün olmaması nedeniyle genellikle bir sezgisel veya meta-sezgisel algoritma ile üretilen uygun hat tasarımlarının performans değerlerinin hesaplanmasında simülasyonun kullanıldığı görülmektedir. Simülasyonun bir performans değerlendirme yöntemi olarak kullanıldığı son zamanlarda yapılan bazı çalışmalar şu şekilde verilebilir.

Mendes ve diğerkleri (2005) karışık modelli bir PC-kamera montaj hattı için değışen stokastik talep miktarlarını da göz önünde bulundurarak tavlama benzetimi ve simülasyon birleşimi bir prosedür önermişlerdir. Tavlama benzetimi ile elde edilen uygun bir hat tasarımı simülasyon ile değıerlendirilerek toplam akış zamanı ve istasyon kullanım oranları gibi performans değıerleri belirlenip en iyi performansa sahip hat tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Su ve Lu (2007) montaj hatlarında iş yükünün dağıtımı ve sıralanması problemi için bir genetik algoritma geliştirmişler ve elde edilen uygun hat tasarımı simülasyon ile değıerlendirerek performans değıerlendirmesi yapmışlardır. Kuo ve Yang (2011) montaj hattı tasarımı için parçacık sürüşü algoritmasını kullanarak bir simülasyon yaklaşımı geliştirmişlerdir. Mutasyon tabanlı bir parçacık sürüşü algoritması ile elde edilen uygun tasarımlar yönetimsel bazı performans parametrelerini optimize etmek amacıyla simülasyon kullanılmıştır. Geliştirilen yaklaşımın literatürde var olan genetik algoritma ve geleneksel parçacık sürüşü algoritmalarına göre daha etkin olduğı gösterilmiştir. Tiacci (2012) montaj hatlarının performans değıerlendirmesi için olay ve nesne tabanlı bir simülasyon programı geliştirmiştir. Çok ürünlü, stokastik görev zamanlı, paralel istasyonlu, sınırlı bekleme yerine sahip ve önceden belirlenmiş bir ürün sırasının olduğı düz ve U-tipi MHDP ele alınmıştır. Performans göstergesi olarak geleneksel MHDP amaçlarından farklı olarak hat çıktı hızı kullanılmıştır. Tiacci (2015), Tiacci (2012) çalışmasında geliştirdiğı simülasyon programını genetik algoritma ile elde ettiğı her bir uygun montaj hattı tasarımı için performans değıerlendirmesinde kullanarak MHDP'yi çözmüştür. Ele alınan MHDP Tiacci (2012) ile aynıdır. Performans parametresi yine çıktı hızı olarak kabul edilmiştir. Literatürde yer alan iki farklı çözüm yaklaşımı ile karşılaştırarak önerilen modelin etkinliğı gösterilmiştir.

Stokastik MHDP için literatürde dikkate alınan çözüm yöntemleri ve amaç fonksiyonları değıerlendirildiğinde; çözüm yöntemlerinin sezgiseller, matematiksel modeller ve simülasyon üzerine yoğunlaştığı, amaç fonksiyonu olarak genellikle maliyet en küçüklenmesi ile son zamanlarda çok amaçlı yaklaşımların yaygınlaştığı görülmektedir. Ancak literatürde simülasyona alternatif olarak stokastik üretim sistemlerinin modellenmesinde etkin bir araç olarak kullanılan kuyruk ağlarının montaj hatlarının performans değıerlendirmesi ve dengelenmesinde bir çözüm yöntemi olarak kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca Bölüm 2.1.2'de belirtildiğı üzere çevrim zamanı en küçüklenmesi, maliyet en küçüklenmesi gibi kapasite temelli amaçların dışında istasyon kullanım oranlarının dengelenmesi, hat WIP miktarının en küçüklenmesi, hat çıktı hızının

en büyüklenmesi gibi hattın performansına yönelik amaç fonksiyonlarının dikkate alındığı çalışmalar da çok az sayıdadır. Bu tür amaçlara genellikle simülasyon ile performans değerlendirmesinin yapıldığı çalışmalarda rastlanmaktadır. Simülasyonun alternatif çözüm sayılarının artması ile etkinliğini kaybetmesinden dolayı performans değerlendirmesinde kuyruk ağları yaklaşımlarının daha etkin olarak kullanılabileceği düşünülmektedir (Buzacott ve Shanthikumar, 1993). Bu tez çalışmasında stokastik MHDP için kuyruk ağları kullanılarak hatta meydana gelen değişkenlik modellenmiş, görev atamaları yapıldıktan sonra hattın performansı değerlendirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak hat performans değerleri olan istasyon kullanım oranları ve hattaki ortalama iş parçası sayısı (WIP) dikkate alınmıştır.

3.2. Kuyruk Ağları

Kuyruk ağları iletişim ağları, üretim sistemleri, ekonomi ve bilgisayar sistemleri gibi birçok gerçek hayat sistemlerinde uygulama alanı bulan bir performans değerlendirme aracıdır. Atölye tipi, akış tipi, esnek imalat sistemleri ve montaj sistemleri gibi birçok üretim sisteminin performansı kuyruk modelleri ile yaygın olarak değerlendirilmektedir (Dallery ve Gershwin, 1992). Bu yüzden kuyruk ağlarının üretim uygulamaları literatürü oldukça geniştir. Tez çalışmasının temel konusu bir akış tipi üretim sistemi olan montaj hatları olduğu için, kuyruk ağlarının montaj hatları ve montaj sistemleri üzerine yapılan çalışmalarından bahsedilecektir. Bu çalışmalar Çizelge 3.3'te özetlenmiştir. Montaj sistemleri birbiri ardına sıralı işlem istasyonlarından ve hattın belirli yerlerine yerleştirilmiştir montaj istasyonlarından oluşur. İşlem istasyonlarında iş parçası üzerinde herhangi bir işlem gerçekleştirilirken, montaj istasyonlarında dışardan veya birkaç işlem istasyonundan gelen iş parçalarının montajı yapılır. Montaj hatlarında ise iş parçası bir taşıyıcı üzerinde hareket ederken iş parçası üzerinde ilgili işlemler gerçekleştirilir.

Harrison (1973) montaj hatları için bir kuyruk teorisi modeli önermiştir. Modelde bekleme yeri kapasitesinin 2'den büyük ve her bir istasyonda tek işlemcinin olduğu varsayılmıştır. Performans parametresi olarak istasyonlar arasındaki bekleme zamanları dikkate alınmıştır. Bekleme zamanlarının uygun iş yükü şartları (istasyon kullanım oranı) altında nasıl yakınsadığını analiz etmek üzere limit teoremine dayalı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Ele alınan bir montaj sisteminde kararlı duruma kullanım oranının birden küçük olduğu

durumlarda ulaşıldığı gösterilmiştir. Eğer bekleme yeri kapasitesi sınırlı ise montaj hattındaki herhangi bir kuyruk uzunluğunun sınırsız bir şekilde artacağı belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Montaj hatları ve montaj sistemleri konusunda yapılan kuyruk ağları çalışmaları

Yayın	Geliş Dağılımı	Görev Dağılımı	Bekleme Yeri	Performans Ölçütü	Model ve Çözüm Metodu
Harrison (1973)	Genel	Genel	>2	Bekleme Zamanı	Kuyruk Modeli
Lipper ve Sengupta (1986)	Poisson	Üssel	>1	Bloke Olasılığı Çıktı Hızı	Kuyruk Prosedürü
Blumenfeld (1989)	Genel	Genel	>1	Kuyruk Uzunluğu Sistemde Geçen Zaman	
Duenyas ve Hopp (1993)	Üssel	Üssel	>1	Çıktı Hızı	
Asadathorn ve Chao (1999)	Poisson	Üssel	>1	Çıktı Hızı	Ayrıştırma Modeli
Azaron, Katagari, Kato ve Sakawa (2006)	Poisson	Üssel		Teslim Süresi Toplam İşlem Maliyeti	Açık Kuyruk Ağları Üssel Taşıma Süreleri
Azaron ve Kianfar (2006)	Poisson	Üssel		Teslim Zamanı Olasılığı	STEM Modeli
Perkgoz, Azaron, Katagiri, Kato ve Sakawa (2007)	Poisson	Üssel		Teslim Süresi Toplam İşlem Maliyeti	Çok Amaçlı Genetik Algoritma
Manitz (2008)	Genel	Genel	>1	Çıktı Hızı	G/G/1/N Ayrıştırma Modeli
Lazaro ve Perez (2009)	Genel	Genel	>1	Bloke ve Aç Kalma Olasılığı	Kapalı Kuyruk Ağları
Manitz ve Tempelmeier (2012)	Genel	Genel	>1	Çıkışlar Arası Değişkenlik Katsayısı	Ayrıştırma Modeli Simülasyon
Lagershausen, Manitz ve Tempelmeier (2013)	Genel	Genel	>1	Çıktı Hızı	G/G/1/K Kapalı kuyruk Ağları
Hillier (2013)		Üssel Erlang	>1	Çıktı Hızı WIP	Ayrıştırma + Sezgisel
Manitz (2015)	Genel	Genel	>1	Çıktı Hızı Çıkışlar Arası Zaman Varyansı	Ayrıştırma Metodu
Wu ve McGinnis (2012)	Genel	Genel		Bekleme Zamanı İstasyon Kullanım Oranı	Parametrik Ayrıştırma

Lipper ve Sengupta (1986), hatta gelişlerin Poisson ve işlem sürelerinin üssel dağılım olduğu bir montaj sistemini kuyruk modeli kullanarak analiz etmiştir. Hatta gelişlerde n adet farklı müşteri sınıfı mevcuttur. Her bir müşteri sınıfı için ayrı bekleme yerlerinin olduğu ve bu bekleme yerlerinin kapasitelerinin eşit ve sınırlı olduğu varsayılmıştır. Eğer bir müşteri geldiğinde kendine ait bekleme yerini dolu bulursa, sistemi terk etmektedir. Performans parametresi olarak bloke olma olasılığı, çıktı hızı, ortalama kuyruk uzunluğu ve sistemde geçen ortalama süre kullanılmıştır. Bu tür bir kuyruk modelinin durum uzayının çok geniş olmasından dolayı performans parametreleri için kesin bir sonuca ulaşılamamıştır. Bu yüzden iki aşamalı bir yaklaşık çözüm prosedürü geliştirilmiştir. İlk

aşamada sistemde geçen ortalama zaman için bir alt ve üst sınır belirlenmekte ve bu sınırlar ikinci aşamada geliş oranlarının asimptotik çözümünde kullanılmaktadır. Önerilen yaklaşımın etkinliği simülasyon ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Blumenfeld (1989) dengelenmiş sıralı iş istasyonlarından oluşan bir montaj sistemini ele almıştır. Esnek montaj sistemlerinde ise işlem süreleri ve çevrim zamanlarının işten işte değişebileceği belirtilmiştir. Bu sebeple sabit ve değişken çevrim zamanları ile hat çıktı hızını tespit etmeye yönelik bir analitik model geliştirilmiştir. Değişken çevrim zamanlı hatların sabit çevrim zamanlı hatlara göre daha büyük çıktı hızı ile çalıştırılabileceği gösterilmiştir. Bunu sağlamak için istasyonlar arasında yeteri kadar bekleme yeri kapasitesi olması gerektiği söylenmiştir. Elde edilen bulguların yatırım maliyeti artışı ve pratik uygulamalar üzerinde kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Duenyas ve Hopp (1993) birden fazla hattın beslediği üssel işlem zamanlarına, birden fazla işlemciye sahip ve CONWIP mekanizması ile kontrol altında tutulan bir montaj hattını analiz etmiştir. Ortalama kuyruk uzunluğu ve çıktı hızını tahmin etmek üzere bir kuyruk modeli yaklaşımı önerilmiştir. Modelde bekleme yeri kapasiteleri sınırsız ve işlem zamanlarının üssel dağılım olduğu varsayılmıştır. Yaklaşım modelinden elde edilen veriler kapasite atama, darboğaz tespiti ve WIP kontrolü için bilgi sağlamak üzere kullanılmıştır. Çıktı hızının makine hızlarına bağlı olarak artan bir fonksiyon olduğu gösterilmiştir. İşlem hızının artırılması ile darboğaz istasyonundaki çıktı hızının artacağı ve daha fazla WIP miktarına imkân vereceği sonucuna ulaşılmıştır.

Asadathorn ve Chao (1999) montaj ve de-montaj sistemlerinin bekleme yeri kapasitesi sınırlı olduğu durumda çıktı hızının analizini yapmışlardır. Sistemde gelişler Poisson iken işlem zamanları üssel dağılım olarak kabul edilmiştir. Sistem parametrelerinin modellenmesi için ayrıştırma metodu kullanılmıştır. Sistem performansı için ayrıştırma metodundan elde edilen doğrusal olmayan denklem sistemleri iteratif bir algoritma ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar simülasyon ile karşılaştırılarak modelin etkinliği test edilmiştir.

Azaron ve diğerleri (2006) çok aşamalı montaj sistemlerinin optimal tasarımı için bir açık kuyruk ağı modeli geliştirmişlerdir. Hatta olan gelişler aynı geliş oranına sahip Poisson süreci takip etmektedir. Ayrıca işlem süreleri de üssel dağılım kabul edilmiştir. İstasyonlar

arası taşıma sürelerinin de birbirinden bağımsız üssel dağılım olduğu varsayılmıştır. Çalışmada ortalama teslim süresi, teslim süresinin varyansı ve sistemin toplam işlem maliyetini en küçükleyecek çok amaçlı bir model önerilmiştir. Önerilen model hedef arama metodu kullanılarak çözülmüş ve optimum işlem oranları ile kontrol parametreleri belirlenmiştir. Azaron ve Kianfar (2006), Azaron ve diğerleri (2006)'nın çalışmalarındaki problemi ürün teslim zamanının olasılığının belirli bir eşik değerden düşük olmasını sağlayacak bir amaç daha ekleyerek genişletmişlerdir. Önerilen çok amaçlı teslim zamanı kontrol problemi STEM metodu ile çözülmüştür. Perkgoz ve diğerleri (2007) ise Azaron ve diğerleri (2006)'nın çalışmasında ele aldığı problemi çok amaçlı genetik algoritma kullanarak çözmüşlerdir.

Manitz (2008), basit üretim istasyonlarının yanı sıra montaj istasyonlarının da olduğu çok aşamalı montaj sistemlerini incelemiştir. Malzeme akışlarının senkronize olmadığı istasyonlardaki işlem zamanlarının stokastik olduğu montaj sistemlerinde kuyruk etkisi araştırılmıştır. İstasyonlar arasında bekleme yerlerine izin verilirken işlem süreleri genel dağılım olarak varsayılmıştır. Böyle bir montaj hattında çıktı hızının tahmin edilmesi için bir yaklaşım modeli önerilmiştir. Yaklaşım modeli ayrıştırma modeline dayanmaktadır. Kuyruk modeli olarak G/G/1/N sistemi tercih edilmiş ve gelişler, işlem oranları, alt sistemler arası değişkenlik katsayısının karesinin dönüştürülmesi için iteratif bir çözüm yöntemi sunulmuştur. Örnek bir montaj hattı ile önerilen model ve simülasyon karşılaştırılarak, modelin kalitesi değerlendirilmiştir.

Lazaro ve Perez (2009), özellikle otomobil montaj hatlarında çok önemli olan istasyon açılığı ve bloke olma durumunu incelemişlerdir. Gerçek bir otomobil üretim hattı, konveyör bekleme yerlerini ve makineler kapalı form bir ağı temsil etmek üzere modellenmiştir. Makineler arası duraksamaların birinden diğerine nasıl aktarıldığı analiz edilmiştir. Örnek bir otomobil montaj hattı üzerinde her bir istasyon için ayrı ayrı bloke ve aç kalma durumları incelenmiştir.

Manitz ve Tempelmeier (2012) montaj hatlarında biten ürünün çıkışlar arası değişkenlik katsayısı için bir yaklaşım modeli önermişlerdir. İncelenen montaj hattı bekleme yerleri sınırlı, genel servis zamanlı bir hattır. Değişkenliğin ifade edilmesinde değişkenlik katsayısı kullanılmıştır. Çıkışlar arası zaman hattın aç kalma, bekleme ve işlem zamanlarının bir fonksiyonu olarak modellenerek değişkenlik katsayısı karesinin

dönüştürülmesi tahmin edilmiştir. Önerilen modelin etkinliği simülasyon ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Lagershausen ve diğerleri (2013) birleşen ve ayrışan malzeme akışına sahip, bekleme yeri kapasitesi sınırlı, genel işlem zamanlarına ve sabit iş parçasına sahip bir montaj ve de-montaj hattı sistemini incelemiştir. Bu sistem için G/G/1/K kapalı kuyruk ağları kullanılarak bir ayrıştırma modeli önerilmiştir. Elde edilen sonuçların etkinliği simülasyon ile kıyaslanarak gösterilmiştir.

Hillier (2013) gecikmeli montaj hatlarının optimal tasarımı için kuyruk modellerini kullanmıştır. Hem görevlerin istasyonlara atanması hem de istasyonlar arası bekleme yeri kapasitelerinin belirlenmesi eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak sistem çıktı oranı ve WIP maliyetleri dikkate alınmıştır. Görev zamanı olarak üssel ve Erlang dağılımları kullanılmıştır. Küçük hatlar için tam çözüm yöntemi kullanılırken büyük hatlar için bir sezgisel önerilmiştir. Önerilen modellerin etkinliği simülasyon ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. WIP maliyetleri önemli olduğunda, çanak etkili bir iş yükü ataması yerine, optimal atamanın ilk istasyona daha çok iş atama şeklinde gerçekleşeceğini belirtmiştir.

Manitz (2015), Manitz (2008) çalışmasında önerdiği çözüm modelini bekleme yerleri sınırlı, genel işlem zamanlı senkronize olmayan de-montaj sistemlerini de ekleyerek genişletmiştir. Sistemin çıktı hızı ve çıkışlar arası zaman varyansının performans değerlendirmesi ayrıştırma metodu ile ele alınmıştır. Önerilen modelin sonuçları simülasyon ile karşılaştırılarak etkinliği gösterilmiştir.

Kuyruk ağlarının son zamanlarda üretim sistemlerinin performansının değerlendirilmesi için kullanıldığı bir çalışma olan Wu ve McGinnis (2012), kullanılan yaklaşım metotlarının bu tez çalışmasında kullanılanlar ile benzerliği ile dikkat çekmektedir. Çalışmada bekleme zamanı ve istasyon kullanım oranı arasındaki ödünleşim araştırılmıştır. Bunun için genel işlem zamanlı Kingman (1961) parametrik ayrıştırma metodu kullanılmıştır. Birbirine sıralı şekilde bağlı 14 istasyona sahip bir üretim sistemi verileri kullanılarak önerilen performans değerlendirme prosedürü test edilmiş ve simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Kuyruk ağlarının montaj hattı ve sistemlerinin performans değerlendirilmesinde kullanılmasının yanı sıra çeşitli optimizasyon problemlerinde de kullanıldığı görülmektedir. Bu problemler montaj hatlarında bekleme yeri ataması ve optimizasyonu, iş yükü atama ve WIP kontrol stratejilerinin optimizasyonu gibi problemlerdir. Çizelge 3.4'te özetlenmiş kuyruk ağlarının üretim sistemlerinde bazı optimizasyon uygulamalarından bahsedilmekle beraber diğer çalışmalar hakkında detaylı bilgi için Bitran ve Morabito (1996) literatür çalışması incelenebilir.

Çizelge 3.4. Kuyruk ağlarının optimizasyon problemleri uygulamaları

Yayın	Problem	Performans Ölçütü	Model ve Çözüm Metodu	Açıklama
Smith ve Daskalaki (1988)	Bekleme Yeri Optimizasyonu	Çıktı Hızı	Açık Kuyruk Ağları Expansion Metot Powell Arama Sezgiseli	Görev Süreleri Üssel Montaj Hattı
Hemachandra ve Eedupuganti (2003)	Bekleme Yeri Optimizasyonu	Çıktı Hızı Bekleme Zamanı WIP	Fork Join Kuyruk Modelleri	Açık Montaj Sistemleri
Hillier ve So (1996)	İş Yüğü ve Paralel Makine Sayısı Optimizasyonu	Çıktı Hızı	Kuyruk Ağları	L-Fenomeni
Hopp, Spearman, Chayet, Donohue ve Gel (2002)	Kapasite Planlama	Tasarım Maliyeti Çıktı Hızı	Kuyruk Ağları	
Huang ve Wang (2010)	Kapasite planlama	Kullanım Oranı Düzenleştirilmesi Çıktı Hızı Üretim Mly.	Kapalı Jackson Kuyruk Ağları Eş Zamanlı Genetik Algoritma	

Bekleme yeri atama optimizasyonu için yapılan kuyruk çalışmaları şu şekilde verilebilir. Smith ve Daskalaki (1988) otomatik montaj hatlarını açık kuyruk ağı olarak modelleyip bir sezgisel algoritma ile hattın optimum bekleme yeri kapasitesini belirlemişlerdir. Bir optimizasyon prosedüründe açık kuyruk ağını analiz etmek için Expansion metot, bekleme yeri kapasitesi ataması için ise Powell optimizasyon prosedürü entegre edilmiştir. Elde edilen her bir atama için kuyruk ağı modeli çeşitli topolojilerde çıktı hızını değerlendirmek için kullanılmıştır. Hemachandra ve Eedupuganti (2003) fork-join kuyruk ağlarını kullanarak senkronize olmuş açık montaj sistemlerinde bekleme yeri optimizasyonu çalışmışlardır. İşlem sürelerinin üssel olduğu bekleme yerleri sınırlı bir hat tasarımı ele alınmıştır. Optimum bekleme yeri kapasitesinin belirlenmesi için çıktı oranının en büyüklenmesi, bekleme zamanının en küçüklenmesi ve WIP miktarının en küçüklenmesi

amaçları için ayrı ayrı önerilen model test edilmiştir. Kuyruk ağlarının bekleme yeri kapasitesi optimizasyonu için daha fazla çalışmaya Demir, Tunalı ve Eliyi (2014) çalışmasından ulaşılabilir.

Hillier ve So (1996) iş yükü ve paralel makine sayısı optimizasyonu için çıktı hızını maksimum yapacak bir çözüm prosedürü önermişlerdir. İşlerin istasyonlara L-fenomeni ve çok-işlemci fenomenine uygun olarak atandığını gösteren iki ilginç sonuç elde edilmiştir. Hopp ve diğerleri (2002) yarı iletken plaka üreten bir fabrikada istenilen çıktı hızı ve çevrim zamanı için hat tasarım maliyetini minimum yapacak kapasite planlama optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Örnek bir veri seti ile istasyonlara ne kadar makine atanması gerektiği tespit edilmiştir.

Huang ve Wang (2010) istasyonlara görev ataması ile istasyonların kapasite planlamasını bir arada gerçekleştiren bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada istasyonlara görev ataması istasyon kullanım oranlarının düzgünleştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir. Kapasite planlaması için çıktı hızını en büyükleyen ve üretim maliyetini en küçükleyen bir kapalı Jackson kuyruk ağı modeli kullanılmıştır. Görev atama kombinasyonu ile kapasite planlamasının birleştirilmiş problemi geliştirilen eşzamanlı genetik algoritma ile çözülmüştür. Bu çalışma amaç fonksiyonu açısından tez çalışması ile benzerdir.

Literatürde direkt tez çalışmasının konusu olan MHDP ile ilgili kuyruk ağları çalışmaları Çizelge 3.5'te özetlenmiştir. Bu çalışmalardan en yakın ilişkinin olduğu çalışmalara Bitran ve Tirupati (1989), Lee ve Johnson (1991) ve Alağaç, Yüzükırmızı ve Türker (2013) örnek verilebilir. Bitran ve Tirupati (1989) hedef belirleme ve dengeleme problemi için WIP, teslim zamanı ve kapasite arasındaki ilişkiyi tanımlamak için ödünleşim eğrileri sunmuşlardır. Hedefleme problemi belirlenen bir WIP seviyesine ulaşmak için sistem kapasitelerinin belirlenmesi problemidir. Dengeleme problemi ise toplam iş yükünün istasyonlara dengeli olarak dağıtılması problemidir. Çalışmada her iki problem için de performans ölçütlerinin tahmin edilmesi için açık kuyruk ağları için geliştirilen parametrik ayrıştırma metodu kullanılmıştır. Bu yüzden her iki problem için geliştirilen matematiksel modeller doğrusal değildir. Modellerin çözümünün zorluğu nedeniyle sezgisel algoritmalar önerilmiştir. Bu sezgiseller performans ölçütleri arasındaki ödünleşim eğrilerinin çizilmesi için kullanılmıştır.

Lee ve Johnson (1991) esnek montaj sistemlerinin tasarımı ve dengelenmesi için bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Esnek montaj sistemleri, seri şekilde sıralanmış bir veya birkaç paralel makineden oluşan montaj istasyonlarının tek yönlü bir otomatik taşıma sistemi ile birbirine bağlanmış robot kontrollü montaj hatlarıdır. Çalışmada görev atamaları, istasyon sayısı ve istasyonlarda gerekli makine sayılarının belirlenmesi için tam sayılı programlama kullanılmıştır. İstasyonların ortalama ve varyansları dikkate alınarak kapalı kuyruk ağı analizi ile gereken malzeme taşıma sistemi kapasitesi belirlenmiştir. Bu iki analiz modeli iteratif bir algorithmada birleştirilerek sayısal analizler yapılmıştır.

Çizelge 3.5. Kuyruk ağlarının MHDP uygulamaları

Yayın	Problem	Performans Ölçütü	Model ve Çözüm Metodu	Açıklama
Bitran ve Tirupati (1989)	Hedef Belirleme ve Dengeleme Problemi	WIP Teslim Zamanı	Stokastik Modelleme Açık Kuyruk Ağları Ayrıştırma Metodu	
Lee ve Johnson (1991)	Esnek Montaj Hattı Dengeleme ve Tasarımı	Görev Atama İstasyonlarda Gerekli Makine Sayılarının Belirlenmesi	Tam Sayılı Programlama Sezgisel	
Alağuş ve diğerleri (2013)	Görev Atama Hat Dengeleme	Çıktı Hızı	Kapalı Kuyruk Ağı Ortalama Değer Analizi Kısıt Programlama	Üssel Görev Zamanları

Alağuş ve diğerlerinin (2013) çalışması kullanılan metodolojiler açısından tez çalışmasına en çok benzeyen çalışmadır. Görev sürelerinin üssel dağılım kabul edildiği bir montaj hattı kapalı kuyruk ağı olarak modellenmiştir. Kısıt programlama ile elde edilen görev atama kombinasyonlarının ortalama değer analizi ile performans değerlendirmesi yapılmıştır. Tüm uygun görev atama kombinasyonlarından en iyi performansa sahip olan görev ataması belirlenmiştir.

Kuyruk ağlarının montaj hatları ve iş yükü dağılımı problemleri üzerine uygulamaları incelendiğinde Lee ve Johnson (1991) ve Alağuş ve diğerleri (2013) çalışmaları hariç literatürdeki çalışmalarda MHDP'nin doğal kısıtları olan öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı kısıtlarının dikkate alınmadığı görülmektedir. Lee ve Johnson (1991) ise montaj hatlarını kapalı kuyruk ağı olarak modellemiştir. Ancak montaj hatlarının yapısı incelendiğinde açık kuyruk ağlarına daha uygun olduğu görülmektedir. Alağuş ve diğerleri (2013) görev zamanlarını üssel olarak varsayıp kapalı kuyruk ağı modellemesi yapmaktadır. MHDP literatürü incelendiğinde görev zamanlarının normal dağılım veya

düzgün dağılım gibi genel dağılımlar olarak kabul edildiği görülmektedir. Bunun nedeni elde edilecek bir görev atama kombinasyonu için görev sürelerinin toplanabilir olması gerekliliğidir. Tez çalışmasında ise görev zamanları bir ortalama ve varyansa sahip genel dağılım olarak kabul edilmiştir ki bu durum MHDP doğasına daha uygundur.

Yukarıda belirtilen üretim sistemleri ve montaj hattı çalışmalarından anlaşılabileceği üzere kuyruk ağları üretim sistemlerinin performans değerlendirmesinde kullanılabilecek uygun bir araçtır. Bu bağlamda Zhuang, Wong, Fuh ve Yee (1998) kuyruk ağlarının çıktı hızı, çevrim zamanı, kullanım oranı ve WIP miktarı gibi performans ölçütlerinin belirlenmesindeki rolünü incelemiştir. Çalışmada, kuyruk ağlarının üretim ve montaj sistemlerinin tasarımı ve analizinde önemli bir rol oynayabileceği gösterilmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar dışında kuyruk ağlarının literatürdeki üretim uygulamalarını detaylı olarak incelemek için Papadopoulos ve Heavy (1996), Govil ve Fu (1999) tarafından yapılan literatür araştırması çalışmalarından faydalanılabilir. Ayrıca açık kuyruk ağlarının üretim sistemleri çalışmaları için Dallery ve Gershwin (1992) çalışması incelenebilir.

3.3. Kısıt Programlama

Kısıt programlama birçok kombinatoriyal NP-zor problemin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Topaloğlu ve diğerleri, 2012). KP az hesaplama zamanı ile tutarlı analizler yapılmasını sağlar. Bu açıdan çizelgeleme gibi üretim problemlerinin de olduğu konularına göre sınıflandırılmış bazı KP uygulamaları şöyle sıralanabilir. Çok yaygın olarak kullanılan bir KP alanı olan yakın zamandaki çizelgeleme çalışmaları Zeballos (2010), Terekhov, Doğru, Özen ve Beck (2012) olarak verilebilir. Bunların yanı sıra Li ve Womer (2012) matematiksel programlama ile KP'nin birleşiminden oluşan bir algoritmayı tedarik zinciri konfigürasyonu için önermişlerdir. Araç sıralama problemi ise diğer bir üretim uygulaması olarak karşımıza çıkmaktadır. Siala ve diğerleri (2015) araç sıralama problemini çözmek için KP içeren bir budama sezgiseli önermişlerdir. Burada verilen daha çok üretim uygulamalarının yanı sıra KP'nin diğer problemlerin çözümü için uygulamaları Brailsford, Chris ve Barbara (1999) çalışmasından incelenebilir.

KP'nin birçok problem çözümünde uygulaması olmasına rağmen, MHDP'nin çözümü için uygulaması oldukça azdır (Topaloğlu ve diğerleri, 2012). Bockmayr ve Pisaruk (2001) KP'nin MHDP uygulamasını ilk ele alan çalışmadır. Çalışmada tamsayılı programlama (TP) ile KP'nin birleşiminden oluşan dal kesme yöntemine dayalı hibrid bir çözüm yöntemi önerilmiştir. Yapılan sayısal deneyler MHDP'nin çözümünde KP'nin alternatif bir modelleme ve çözüm yöntemi olduğunu göstermişlerdir.

Valle, Marquez, Gasca ve Toro (2003) montaj operasyonlarının seçilmesi ve sıralanması problemi için toplam montaj zamanını en küçükleyecek bir KP modeli önermişlerdir. Modelin Ve/Veya yapısındaki alternatif montaj operasyonlarını kullanarak gerçek hayat problemlerinde kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Pastor, Ferrer ve Garcia (2007) MHDP için KP modeli ile iki farklı TP modelini hesaplama açısından kıyaslayan bir çalışma yapmışlardır. MHDP için hem tip-1 hem de tip-2 problemlerinin modelleri geliştirilmiştir. Yazarlar modellerin etkinlik açısından birbirleri ile karşılaştırılabilir olmadığını belirtmesine rağmen, KP'nin özellikle büyük boyutlu problemlerde KTP'den daha iyi ve hızlı olduğunu göstermişlerdir.

Topaloğlu ve diğerleri (2012) MHDP çözümü için kural tabanlı bir KP modeli önermişlerdir. KP ve TP modelleri için modelleme kapasitesi, çözüm kalitesi ve CPU zamanı açısından karşılaştırmalı sonuçlar sunmuşlardır. KP'nin çözümde TP'den daha etkili ve etkin olduğunu göstermişlerdir.

Literatürde çok az da olsa KP'nin kuyruk modellerinin çözümünde kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Bunlar Terekhov ve Beck (2008) ve Terekhov, Beck ve Brown (2009) olarak verilebilir. Terekhov ve Beck (2008) stokastik müşteri gelişleri ve işlem zamanları kısıtı altında bir satış ofisindeki ön ve arka odada bulunan işçiler arasındaki değişim durumlarını optimize etmek için bir KP modeli önermişlerdir. Stokastik kuyruk kontrol problemini KP kullanarak çözmüşlerdir. İşçi atama problemi için ise KP ve bir sezgiselden oluşan hibrid bir teknik önermişlerdir. Geliştirilen KP tabanlı sezgiselin büyük boyutlu problemlerde dahi etkin ve hızlı bir yöntem olduğunu göstermişlerdir.

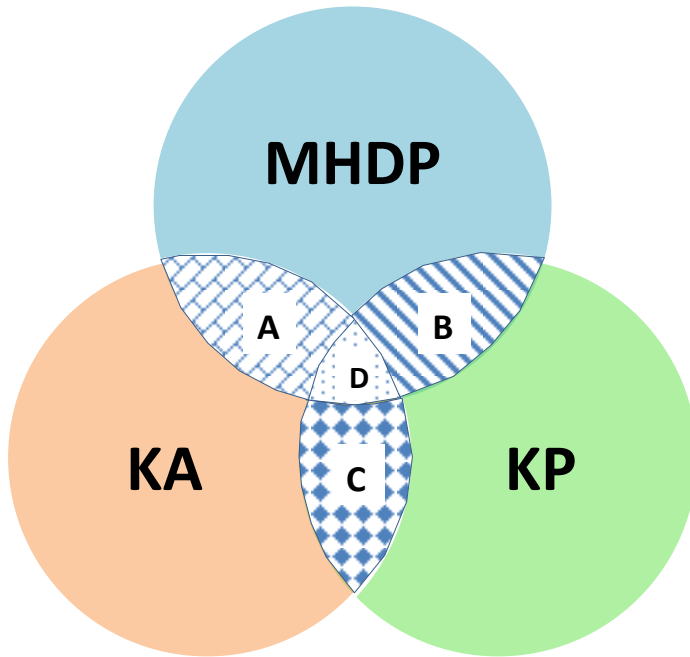
Terekhov ve diğerleri (2009) çalışmasında satış ofislerinin ön ve arka oda işçilerinin istihdam maliyetini de göz önünde bulundurarak optimal işçi atamasını belirlemek için

mantıksal bir KP tabanlı Benders ayrıştırma metodu önermişlerdir. Bu çalışmada kuyruk optimizasyonu ile kısıt programlama arasında bir bağlantı olduğu gösterilmiştir.

Tez çalışmasında ele alınan problem ve çözüm yöntemleri Şekil 3.1’de verildiği gibi bir Venn şeması olarak gösterildiğinde, önceki bölümlerde bahsedilen literatür çalışmaları da göz önünde bulundurularak literatüre katkı daha da kolay anlaşılabacaktır.

Şekil 3.1’de ana kümeler MHDP, kuyruk ağları (KA), kısıt programlama (KP) olarak gösterilmiştir. Bu ana kümelerin kesiştiği alanlar ise A, B, C ve D şeklinde gösterilmiştir. A alanı MHDP ve KA çalışmaları, B alanı MHDP ve KP çalışmaları, C alanı KA ve KP çalışmaları ve D alanı MHDP, KA ve KP birleşimi olan çalışmaları göstermek üzere tanımlansın.

Tez çalışmasının literatüre katkısının Şekil 3.1’de A, B, C ve D alanlarına karşılık geldiğini söylemek mümkündür. Bu katkılar aşağıdaki gibi özetlenebilir.



Şekil 3.1. Tez çalışmasında dikkate alınan problemler

- Literatür çalışmaları incelendiğinde MHDP için stokastikliğin çoğunlukla görev zamanlarında dikkate alındığı görülmektedir. Ancak stokastiklik talepler, ekipman arızaları ve hatalı ürün oranlarında da karşımıza çıkmaktadır. Üretim sistemlerinde

stokastik durumların modellenmesi ve performans değerlendirmesinde kullanılan kuyruk ağları bu tür stokastik durumların montaj hatlarında da etkisini modellemek için kullanılabilecek etkili bir araçtır. Bu bağlamda tez çalışmasında verilen istasyon sayısı ve bir görev seti için stokastik durumların etkisinde montaj hatlarında tasarım problemi ele alınmıştır (Alan A).

- Kombinatorial problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan ancak MHDP çözümünde uygulaması oldukça az olan KP'nin atama kısıtları da dahil olmak üzere MHDP için bir uygulaması gerçekleştirilmiştir (Alan B).
- KP'nin kuyruk ağları ile modellenen bir sürecin çözümünde kullanılmasına literatürde sadece iki çalışmada rastlanılmıştır. Tez çalışmasında geliştirilen kuyruk ağları ile entegre modeller KP kullanılarak çözülmüştür. Literatüre olan bu katkı Alan C ile gösterilmiştir.
- Tez çalışmasında geliştirilen doğrusal olmayan modeller (özellikle ayrıştırma modeli) hem MHDP'ye özgü kısıtlar, hem de kuyruk ağlarına özgü kısıtlar içermektedir. Ayrıca modelin çözümü KP ile modellenerek gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde D ile gösterilen alanda tüm kümelerin kesiştiği birleştirilmiş bir çalışma da literatüre kazandırılmıştır.

4. MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR KISIT PROGRAMLAMA MODELİ

Bu bölümde, deterministik görev zamanlı atama kısıtlı tip-2 MHDP için yeni bir kısıt programlama modeli önerilecektir. Önerilen KP modeli Pastor ve diğerleri (2007) tarafından önerilen KP modeline dayanmaktadır. Yazarlar tarafından geliştirilen model MHDP’de yer alan atama kısıtları da eklenerek geliştirilmiştir. Bu model ile daha sonraki bölümlerde geliştirilecek olan matematiksel modellerin çözüm yöntemlerinde kullanılacak olan KP’nin MHDP çözümünde etkin bir yöntem olduğunu göstermek amaçlanmıştır.

Çalışmada tip-2 MHDP ele alınmıştır. Bölüm 3.1’de literatür araştırmasında da bahsedildiği üzere tip-2 çalışmaları literatürde oldukça azdır. Ayrıca atama kısıtlarının da dikkate alındığı çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır.

Bu bölümde dikkate alınacak matematiksel model ve KP modelleri için varsayımlar;

- Görev zamanları deterministik ve bellidir.
- Toplam istasyon sayısı bilinmektedir ve sabittir
- Hatta tek modellenli üretim söz konusudur
- Öncelik şeması bilinmektedir
- Uyumlu ve uyumsuz görev kısıtları dikkate alınmıştır
- Görevler arasındaki uzaklık kısıtları dikkate alınmıştır
- Paralel görev veya istasyonlara izin verilmemiştir
- Ara stoklara müsaade edilmemiştir, şeklinde verilebilir.

İlerleyen bölümlerde MHDP’de görülen atama kısıtları, bu kısıtları dikkate alan literatür çalışmaları, atama kısıtlı MHDP (AKMHDP) için matematiksel model, önerilen KP modeli ve son olarak sayısal sonuçlar ve tartışma bölümü verilecektir.

4.1. Montaj Hattı Dengelemede Atama Kısıtları

MHDP’yi ele alan çalışmalarda genel varsayım öncelik ilişkileri ile tüm istasyonlarda aynı ekipman ve işçi kullanıldığı varsayımdır. Ancak montaj hatlarında teknolojik veya operasyonel kararlar nedeniyle çeşitli atama kısıtları ile karşılaşılacaktır. Ayrıca bu atama kısıtları hattın yeniden dengelenmesi durumunda gerekli olmaktadır. Örneğin,

birbirini etkileyen iki makinede yapılan iki görev (pres ve hassas işleme gibi) farklı istasyonlarda ve aralarında belirli bir mesafe olacak şekilde istasyonlara atanmalıdır. Bunun yanı sıra, bazı görevler ekipman ihtiyacı, istasyon çalışma alanı darlığı, operatör yetenekleri ve diğer üretim şartlarına bağlı olarak önceden belirlenmiş istasyonlara atanmak zorunda olabilir.

Basit MHDP öncelik ilişkileri, çevrim zamanı, istasyon sayısı ve istasyona atama kısıtlarının yanında aşağıdaki başlıca atama kısıtları ile genelleştirilebilir (Boysen ve diğerleri, 2007).

- Görev (bölgeleme) kısıtları: İki farklı bölgeleme kısıtı vardır: Uyumlu ve uyumsuz görevler. Uyumlu görevler yüksek maliyetli kaynak gereksinimi nedeniyle aynı istasyona atanması gereken kısıtları ifade eder. Buna karşın, uyumsuz görevler farklı ekipman ihtiyacı nedeniyle farklı istasyonlara atanması gereken görev kısıtlarını ifade eder (Purnomo, Wee ve Rau, 2013; Tuncel ve Topaloğlu, 2013).
- Kaynak kısıtları: Bazı makinelerin büyük boyutları veya göreve özel işlemler gerçekleştirmesi nedeniyle hatta özel bir çalışma alanı ihtiyacı doğduğunda, kaynak kısıtları ortaya çıkar (Boysen ve Flidner, 2008; Liu ve Chen, 2002).
- İstasyon kısıtları: Bazı görevlerin önceden belirlenmiş istasyonlara atanması kısıtlarıdır. İki ayrı istasyon kısıtı vardır. Birincisi bir görev belirli bir istasyon atanmak zorundadır, ikincisi, bir görev belirli bir istasyona atanmamalıdır (Gadidov ve Wilhelm, 2000; Lapierre, Ruiz ve Soriano, 2006; Tuncel ve Topaloğlu, 2013).
- Uzaklık kısıtları: Bazı üretim süreci ihtiyaçları nedeniyle, görevler arasında minimum veya maksimum uzaklık kısıtları gerekebilir. Minimum uzaklık kısıtına örnek vermek gerekirse, boyama görevinden sonraki bir işin iş parçası üzerindeki boya kuruduktan sonra yapılması gösterilebilir. Bu yüzden boyanın kuruması için arada belirli bir mesafe geçmesi gereklidir. Maksimum uzaklık kısıtına ise kaynak yapma görevinin soğutma görevinden belirli bir mesafe uzak olması örnek verilebilir (Pastor ve Corominas, 2000; Purnomo ve diğerleri, 2013).

Scholl, Flidner ve Boysen (2010) çalışmalarında geçen literatüre son zamanlarda yapılan yeni çalışmaların da eklenmesi ile oluşturulan AKMHDP literatür özeti Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AKMHDP için literatür araştırması

Kısıt Tipi	Makale	Çözüm Yöntemi
Uyumlu	Pastor ve Corominas (2000)	M, H
	Lapierre ve Ruiz (2004)	H
	Rekiek, De Lit, Pellichero, L'Eglise, Fouda, Falkenauer ve Delchambre (2001)	H
	Rekiek, De Lit ve Delchambre, (2002)	H
	Miralles (2005)	M
	Vilarinho ve Simaria (2002, 2006)	M, H
	Boysen ve Fliedner (2008)	M
	Purnomo ve diğerleri (2013)	H
	Tuncel ve Topaloğlu (2013)	M
Uyumsuz	Bautista, Suarez, Mateo ve Companys (2000)	H
	Pastor ve Corominas (2000)	M, H
	Rekiek ve diğerleri. (2001)	H
	Bautista ve Pereira (2002)	H
	Boysen ve Fliedner (2008)	M
	Lapierre ve Ruiz (2004)	H
	Vilarinho ve Simaria (2002, 2006)	M, H
	Purnomo ve diğerleri. (2013)	H
	Tuncel ve Topaloğlu (2013)	M
Kaynak	Carnahan ve diğerleri (2001)	H
	Liu ve Chen (2002)	M, H
	Pastor, Andres Duran ve Perez (2002)	H
	Sawik (2002)	M
	Wilhelm ve Gadidov (2004)	M
	Miralles (2005)	M
	Ağpak ve Gökçen (2005)	M
	Bautista ve Pereira (2007)	H
	Boysen ve Fliedner (2008)	M
	Corominas, Ferrer ve Pastor (2011)	M
İstasyon	Kim, Kim ve Kim (2000)	H
	Gadidov ve Wilhelm (2000)	M
	Lee, Kim ve Kim (2001)	H
	Pastor ve diğerleri. (2002)	H
	Rekiek ve diğerleri. (2001, 2002)	H
	Lapierre ve Ruiz (2004)	H
	Vilarinho ve Simaria (2006)	M,H
	Lapierre ve diğerleri (2006)	H
	Purnomo ve diğerleri. (2013)	H
	Tuncel ve Topaloğlu (2013)	M
Uzaklık	Deckro (1989)	M
	Pastor ve Corominas (2000)	M,H
	Purnomo ve diğerleri. (2013)	H

M: Matematiksel Model, H: Sezgisel

Çizelge 4.1’de özetlendiği üzere AKMHDP için genellikle matematiksel model ve sezgisel çözüm teknikleri üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada AKMHDP için KP kullanılarak yeni bir çözüm metodu önerilmiştir. Literatürde AKMHDP için KP geliştirilen bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

4.2. Matematiksel Model

Çalışmada dikkate alınan matematiksel modelin Scholl ve diğerleri (2010) tarafından önerilen modele dayandığı söylenebilir. Aşağıda model ile ilgili amaç fonksiyonu ve kısıtlardan bahsedilmiştir.

Amaç fonksiyonu: Verilen bir istasyon sayısı için çevrim zamanı c en küçüklenmesidir.

$$\text{EnKüçük } c \quad (4.1)$$

Karar değişkeni: karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanabilir (eğer görev i istasyon k ’ya atandı ise $x_{ik} = 1$, diğer durumda $x_{ik} = 0$).

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall (i,k) \in (T \times W) \quad (4.2)$$

İstasyon atama kısıtları: Her görev mutlaka bir istasyona atanmalıdır.

$$\sum_{k=1}^{|W|} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in T \quad (4.3)$$

$$x_{ik} = 1 \quad k, i \text{ görevi için önceden tanımlı istasyon numarası} \quad (4.4)$$

Öncelik kısıtları: Bir görev ancak ve ancak kendinden önceki işler atandıktan sonra atanabilir.

$$\sum_{k=1}^{|W|} k \cdot x_{ik} \leq \sum_{k=1}^{|W|} k \cdot x_{jk} \quad \forall (i,j) \in Pr \quad (4.5)$$

Çevrim zamanı kısıtları: Hiçbir istasyon zamanı çevrim zamanını geçemez.

$$c \geq \sum_{i=1}^{\|T\|} t_i \cdot x_{ik} \quad \forall k \in W \quad (4.6)$$

Uyumsuz görev kısıtları: Görev i ve j aynı istasyon k 'ya atanamaz.

$$x_{ik} + x_{jk} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in IT \quad (4.7)$$

Uyumlu görev kısıtları: Görev i ve j aynı istasyona atanmalıdır.

$$\sum_{k=1}^{\|W\|} k \cdot x_{ik} = \sum_{k=1}^{\|W\|} k \cdot x_{jk} \quad \forall (i, j) \in LT \quad (4.8)$$

Minimum uzaklık: İki görev arasındaki minimum uzaklık kısıtı şu şekilde ifade edilir.

$$\left| \sum_{k=1}^{\|W\|} k \cdot x_{jk} - \sum_{k=1}^{\|W\|} k \cdot x_{ik} \right| \geq d_{ij}^- \quad \forall (i, j) \in LD \quad (4.9)$$

Maksimum uzaklık: Görevler arası maksimum uzaklık kısıtları aşağıdaki gibidir.

$$\left| \sum_{k=1}^{\|W\|} k \cdot x_{jk} - \sum_{k=1}^{\|W\|} k \cdot x_{ik} \right| \leq d_{ij}^+ \quad \forall (i, j) \in UD \quad (4.10)$$

Hat etkinliği: Hat kullanım kapasitesini ölçen bir performans göstergesidir. Hattaki boş zaman azalırken çevrim zamanının en küçüklenmesi, hat etkinliğini artırır.

$$HE = \frac{\sum_{i \in \|T\|} t_i}{\|W\| \cdot c} \quad (4.11)$$

4.3. Önerilen Kısıt Programlama Modeli

Daha önce belirtildiği üzere önerilen kısıt programlama modeli Pastor ve diğerleri (2007) tarafından önerilen model temel almaktadır. Bu model aşağıda bahsedilecek Eş. 4.12, Eş. 4.13 ve Eş. 4.15'i içermektedir. Bu çalışmada ise KTP'ye göre daha kolay modelleme

imkânı sağlayan kısıt programlamayı kullanarak uygun tüm görev atama kombinasyonlarını üreten yeni bir KP modeli ve çözüm prosedürü önerilmiştir.

Tanım 2.3.1'i dikkate alarak, MHDP amaç fonksiyonu olmaksızın bir KSP olarak;

- X karar değişkenlerinin seti olsun, $x_i \in X; \forall i \in T$ bu değişkenin değeri görev i 'nin atanacağı istasyon numarasını gösterir.
- D her bir karar değişkeninin çözüm kümesidir. $D(x_i) = \{1, \dots, \|W\|\}$, her görev istasyon sayısı aralığında uygun bir istasyona atanabilir.
- MHDP'nin kısıtlar seti C ise:
 - Görevler arasındaki öncelik ilişkileri kısıtları şu şekilde sağlanabilir

$$x_i \leq x_j \quad \forall (i, j) \in Pr$$

gibi modellenebilir.

Örneğin, 7 görev ve 3 istasyona sahip bir MHDP için KP modeline dayalı bir görev atama kombinasyonu A aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$A = \{(x_1, 1), (x_2, 1), (x_3, 3), (x_4, 1), (x_5, 2), (x_6, 2), (x_7, 3)\}$$

AKMHDP için önerilen KP modeli aşağıdaki gibidir.

Karar değişkeni

$$İstasyonNumarası[Görev_i] \in W \quad \forall i \in T \quad (4.12)$$

Matematiksel modelden farklı olarak, karar değişkeni görev i 'nin atandığı istasyon numarasını göstermek üzere $1, \dots, \|W\|$ değerleri arasında bir tamsayı değer alır. Bu karar değişkeni sayesinde diğer MHDP kısıtlarının sağlanması çok kolay olacaktır.

Öncelik ilişkileri

Görevler arasındaki öncelik ilişkileri aşağıdaki ifade ile sağlanmıştır.

$$İstasyonNumarası[Görev_i] \leq İstasyonNumarası[Görev_h] \quad \forall (i, h) \in Pr \quad (4.13)$$

İstasyon atama kısıtları

MHDP’de eğer bir istasyon açılacaksa, o istasyona en az bir görev mutlaka atanmalıdır. Eğer görev i belli bir k istasyonuna atanmak zorunda ise, istasyon kısıtı $İstasyonNumarası[Görev_i] = k$ şeklinde ifade edilir. Diğer istasyon görev atama kısıtları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\exists_{i \in T} İstasyonNumarası[Görev_i] : (İstasyonNumarası[Görev_i] = k) \quad \forall k \in W \quad (4.14)$$

Bu ifadenin kullanılan paket programda tanımlanması şu şekilde yapılmıştır; $count(İstasyonNumarası[Görev_i; \forall i \in T]; k) \geq 1; \forall k \in W$. Burada “count” ifadesi IBM ILOG CP Optimizer yazılımında tanımlı özel bir fonksiyondur. Bu fonksiyon, en az bir karar değişkeninin k istasyon numarası değerini almasını $(İstasyonNumarası[Görev_i] = k)$ yani i görevinin k istasyonuna atanmasını sağlar. İstasyonlara görevlerin atanması için kullanılabilen diğer bir özellik ise global kısıtlardır. IBM ILOG yazılımda klasik kutu paketleme problemleri için geliştirilmiş olan “pack” global kısıtı kullanılarak da görevlerin istasyonlara atanması kısıtları sağlanabilir. *pack* global kısıtı sayısı önceden belirli a adet kutuya b adet nesneyi c özelliklerine göre mümkün olan en dengeli şekilde atamak için kullanılır. MHDP için a istasyon sayısını, b görev sayısını c ise görev zamanlarını ifade etmektedir. Ayrıca KP modellerinde global kısıtların kullanımı kısıt türetme ve çözüm kümesi azaltma adımlarının daha etkin yapılmasını sağlar. Bu sebeple özellikle çalışmanın son bölümünde kurulan KP modelinin çözümünde *pack* fonksiyonu tercih edilmiştir.

Çevrim zamanı kısıtları

$$\sum_i t_i \leq c \quad \forall i \in T \mid \forall k \in W \wedge (İstasyonNumarası[Görev_i] = k) \quad (4.15)$$

Bir istasyon zamanı o istasyona atanan görevlerin süreleri toplamına eşittir. Bu istasyon zamanları çevrim zamanını geçmemelidir. Eş. 4.15 bu kısıtların sağlanmasını garanti eder.

Görev atama kısıtları

Görev atama kısıtları için aşağıdaki ifadeler kurulabilir.

$$İstasyonNumarası[Görev_i] = İstasyonNumarası[Görev_j] \quad \forall (i, j) \in LT \quad (4.16)$$

$$İstasyonNumarası[Görev_i] \neq İstasyonNumarası[Görev_j] \quad \forall (i, j) \in IT \quad (4.17)$$

Bu şekilde uyumlu ve uyumsuz atama kısıtları sağlanmış olur. Örneğin, $İstasyonNumarası[Görev_1] = İstasyonNumarası[Görev_4]$ ifadesi görev 1 ve 4'ün aynı istasyona atanmasını sağlayacak uyumlu bir atama kısıtıdır. Benzer şekilde, uyumsuz kısıtlar için $İstasyonNumarası[Görev_6] \neq İstasyonNumarası[Görev_7]$ ifadesi görev 6 ve 7'nin aynı istasyona atanmasını önleyecektir.

Uzaklık kısıtları

Görevler arasında olması gereken istasyon aralıkları, ilgili görevlerin karar değişkenleri ile kolayca ifade edilebilir. Bu şekilde uzaklık kısıtları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

Minimum uzaklık kısıtları için,

$$|İstasyonNumarası[Görev_i] - İstasyonNumarası[Görev_j]| \geq d_{ij}^- \quad \forall (i, j) \in LD \quad (4.18)$$

Maksimum uzaklık kısıtları için,

$$|İstasyonNumarası[Görev_i] - İstasyonNumarası[Görev_j]| \leq d_{ij}^+ \quad \forall (i, j) \in UD \quad (4.19)$$

KP modelini oluşturmak, KP uygulama dilinin pratikliği nedeniyle çok kolaydır. Ayrıca KP, özel arama stratejileri ve kısıt türetme algoritmaları ile hızlı bir şekilde çözüm üretebilmektedir. KP çözüm kümesi azaltma tekniğini kullanarak arama ağacında çok daha az uygun düğümü ziyaret eder. Bu avantajlar dikkate alındığında, KP, MHDP'nin çözümü için tercih edilebilir ve etkin bir metot olabilir.

Literatürde tip-2 AKMHDP için bir kısıt programlama yaklaşımına rastlanmamıştır. Önerilen yaklaşım amaç fonksiyonu olarak çevrim zamanının en küçüklenmesini kullanırken bunun yanı sıra üretilen bir görev atama kombinasyonu için hat etkinliği de hesaplanmıştır. Hat etkinliği Eş. 4.11 kullanılarak hesaplanmıştır.

Bölüm 2.3'te bahsedilen KP çözüm algoritması (Bkz. Şekil 2.6) ve temel kavramları dikkate alınarak, KP çözüm prosedürünün MHDP için uyarlaması aşağıda verilmiştir.

Algoritma 1: MHDP için uyarlanmış KP çözüm süreci

Adım 1. (Görev seçimi)

Kısmi bir görev atama çözümü için bir görev seç
Seçilen görev için bir değer ata
Kısıtlar setini üret
Eğer atama için bir görev yoksa
 Geriye dön (Adım 1'in başına dön)
Diğer durumda Adım 2'ye git

Adım 2. (Kısıt türetme ve çözüm kümesi azaltma)

Geçerli kısmi çözüm için kısıtları türet ve çözüm kümesi azaltma algoritmalarını uygula
Karar değişkeni değerlerini ve amaç fonksiyonu (eğer varsa) değerini belirle

Adım 3. (Uygunluk testi)

Eğer görev atamaları en az bir tane kısıtı (öncelik ilişkisi, çevrim zamanı kısıtları gibi) sağlamıyorsa,
 Geriye dön (backtracking)
Diğer durumda Adım 4'e git

Adım 4. (Sonlandırma)

Herhangi bir istasyona atanmamış bir görev varsa, Adım 1'e git (Geriye dön)
Diğer durumda Dur ve sonucu rapor et.

Algoritma 1, temel fikri olan arama ağcının kurulması ile başlar. Herhangi bir istasyona atanmamış görevler olduğu sürece, bu işlerden biri seçilir ve bir kısmi görev ataması çözümüne eklenir. Seçilen göreve bir değer atandıktan sonra, uygunluk testi için tüm kısıtlar türetilir. Bu durumda iki yol vardır. Birincisi kısıt türetme ve çözüm kümesi azaltma prosedürü kısmi çözüm için uygulanır ve sonraki adımlara geçilir. İkincisi, eğer

atanabilir görevler kümesi boş ise, algoritma geriye (baş) döner ve uygunluk testi kısıtlar kümesi türetilerek uygulanır. Eğer kısmi çözüm uygunluk testini geçemezse (yani herhangi bir kısıtı sağlanmazsa) algoritma geriye döner. Atanmamış bir görev varsa, algoritma birinci adıma döner (yani geriye döner), diğer durumlarda algoritma son bulur ve sonuçlar rapor edilir.

4.4. Sayısal Sonuçlar

Önerilen modelin etkinliğini değerlendirmek için, 25 ile 148 görev sayısına sahip dokuz farklı test problemi çözülmüştür. Bu test problemleri literatürde iyi bilinen kıyaslama problemleridir (Scholl, 1993). Ancak bu test problemleri sadece öncelik ilişkisi kısıtlarını içermektedir. Bu nedenle, uygun görev atama kısıtları, istasyon ve uzaklık kısıtları bu çalışmada eklenmiştir. Bu kısıtlara ait veriler Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te atama kısıtlarına göre ayrı ayrı verilmiştir. Örneğin, Warnecke (P58) problemi için, uyumlu ve uyumsuz görev kısıtları sırasıyla görev 43 ve 45 ile görev 34 ve 41 arasında verilmiştir. İstasyon kısıtları için örnek, 10 istasyona sahip problem için görev 3, 6 ve 22 istasyon 3'e atanmalıdır şeklinde verilebilir. Uzaklık kısıtlarına örnek olarak, görev 16 ve 22 arasında minimum iki istasyon uzaklık bulunması gerekirken, görev 44 ve 55 arasında maksimum bir istasyon uzaklık bulunması gerekir, verilebilir.

Çizelge 4.2. Uyumlu ve uyumsuz kısıtların listesi

Yazar	Problem	Uyumlu Kısıtlar	Uyumsuz Kısıtlar
Roszieg	P25	(9,13), (23,25)	(1,8), (8,24), (15,21), (19,25)
Gunther	P35	(2,17), (30,34)	(3,19), (8,13), (17,25), (26,34)
Kilbridge	P45	(1,15), (22,33), (38,45)	(7,31), (18,42), (39,43)
Warnecke	P58	(43,45), (46,47)	(13,27), (34,41), (49,52)
Wee-Mag	P75	(28,56), (41,44), (64,74)	(3,24), (6,51), (11,25), (24,41), (39,51), (52,73), (59,75)
Lutz	P89	(8,15), (19,20), (32,34), (44,63)	(10,33), (20,34), (45,80), (83,85)
Mukherje	P94	(22,26), (29,59), (52,78), (81,82), (88,90)	(5,33), (12,17), (23,54), (40,56), (57,65), (64,71), (72,90), (82,88)
Arcus	P111	(14,22), (47,56), (92,93), (107,109)	(10,25), (17,52), (26,33), (45,64), (71,104), (105,108)
Bartholdi	P148	(4,8), (8, 36), (46,47), (57,65)	(4,140), (17,33), (39,123), (81,118), (127,134), (139,142)

Çizelge 4.3. İstasyon ve uzaklık kısıtları listesi

Problem	İstasyon Numarası	İstasyon Kısıtları {görev, istasyon}	Uzaklık kısıtları {(görev, görev),uzaklık}	
			Minimum	Maksimum
P25	4	{11,3}	{{(4, 22),1}	{{(15,24),1}
	8	{16,5}	{{(18,22),1}	{{(6,7),1}
P35	9	{4,3}, {(20,21),5}	{{(10,16),2}	{{(3,25);4}
	14	{{(11,25,26),11}, {18,5}	{{(16,20),2}	{{(25,26),2}
P45	4	{5,3}, {9,4}, {23,2}	{{(21,24),1}, {(25,28),1}	{{(3,10),2}, {(18,21),1}
	10	{3,7}, {14,2}, {(37,43),4}	{{(2,10),2}, {(25,28),1}, {(33,41),3}	{{(5,9),1}, {(22,33),1}, {(29,37),4}
P58	10	{{(3,6,22),3}, {(36,41),6}, {50,9}	{{(16,22), 2}, {(14,17),4}	{{(18,22),1}, {(44,55),1}
	17	{{(2,22),4}, {(13,20),5}, {35,12}	{{(2,3),3}, {(14,23),4}	{{(7,16), 3}, {(43,48),1}, {(52,56),1}, {(53,57),1}
P75	15	{{(13,22),4}, {29,13}, {44,11}, {46,4}, {72,10}, {56,11}	{{(24,64),2}, {(4,16),2}, {(50,68),1}, {(24,63),3}	{{(4,42),3}, {(23,69),2}, {(68,75),4}
	22	{{(3,7),5}, {14,9}, {20,7}, {24,6}, {(29,36,40),8}, {37,16}, {(56,75),12}, {70,20}	{{(4,16),2}, {(58,63),2}	{{(28,41),1}, {(31,40),1}, {(55,59),1}, {(69,71),4}
P89	19	{{(8,16),3}, {(26,31),6}, {49,9}, {59,12}, {66,13}	{{(1,5),1}, {(23,31),2}, {(40,50),2}, {(43,60),3}	{{(74,82),2}, {(20,30),2}, {(49,55),4}
	28	{{6,1}, {16,10}, {37,15}, {(60,62,65),19}, {(83,84,87),27}	{{(1,5),1}, {(23,31),2}, {(40,50),2}, {(43,60),3}	{{(74,82),2}, {(20,30),2}, {(49,55),4}
P94	16	{{2,2}, {12,4}, {35,7}, {(42,51,61,71),9}, {53,6}, {77,10}, {11,4}	{{(14,21),1}, {(53,57),4}, {(76,77),2}	{{(5,12),2}, {(35,37),2}, {(90,93),1}
	26	{{12,8}, {(14,18,21), 5}, {(47,57), 16}, {85,12}	{{(39,49),3}, {(54,61),2}, {(68,74),2}, {(74,77),4}	{{(10,14),1}, {(20,31),4}, {(55,79),2}
P111	13	{{(8,12,14,18,30),4}, {(95,100,105),12}	{{(8,9),2}, {(34,42),2}, {(76,77),2}, {(91,95),1}	{{(15,21),2}, {(54,62),1}, {(103,106),1}
	27	{{8,10}, {12,2}, {14,3}, {(18,23,42),9}, {(95,100,105),26}	{{(8,9),2}, {(34,42),2}, {(76,77),2}, {(91,95),1}	{{(15,21),2}, {(54,62),1}, {(103,106),1}
P148	10	{{(14,21,34,79), 4}, {(127,138),6}	{{(5,34),2}, {(75,79),2}, {(130,140),1}	{{(7,15),1}, {(53,71),2}, {(112,144),2}
	15	{{9,4}, {20,12}, {(62,63,64,65),9}, {145,11}	{{(5,34),2}, {(75,79),2}, {(130,140),1}	{{(7,159,1), {(53,71),1}, {(112,144),2}

AKMHDP için kıyaslama modeli olarak kullanılacak olan matematiksel model IBM ILOG CPLEX 12.6 matematiksel programlama yazılımı kullanılarak, KP modeli IBM ILOG CP Optimizer 12.6 paket programı kullanılarak çözülmüştür. Her bir problem 10 000 saniye çalıştırılmıştır. Çevrim zamanı, hat etkinliği ve CPU zamanı performans göstergesi olarak rapor edilmiştir. Tüm problemler Intel Core i5-2410M, 2,30 GHz işlemciye ve 5 GB

hafızaya sahip kişisel bilgisayarda test edilmiştir. Atama kısıtları basit MHDP'ye aşağıda bahsedilen üç farklı durumda eklenerek ele alınmış ve bu durumlar için sayısal sonuçlar sonraki bölümlerde verilmiştir.

- Durum 1: Uyumlu ve uyumsuz atama kısıtları
- Durum 2: İstasyon ve uzaklık kısıtları
- Durum 3: Tüm atama kısıtları

4.4.1. Durum 1 sonuçları

Bu durumda basit MHDP'ye verilen uyumlu ve uyumsuz kısıtlar listesinin (Bkz. Çizelge 4.2) dâhil edilmesi ile elde edilen AKMHDP çözülmüştür. CPU zamanı ve çevrim zamanı çözüm kalitesinin değerlendirme parametresi olarak kullanılmıştır. Her bir problem farklı istasyon sayıları ile test edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.4'te rapor edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, çevrim zamanı açısından P25 ile P45 arasındaki problemler için hem KTP hem de KP optimum çözüme ulaşmıştır. Bu problemler için çözüm zamanlarının her iki model için de birbirine yakın olduğu söylenebilir. P58-P89 arası problemler göz önünde bulundurulduğunda, KTP tüm problemler için optimal çözümü bulurken, KP, P75 ve 15 istasyona sahip problem haricindeki test problemleri için optimal çözüme ulaşmıştır. Bu problemler için KP'nin CPU zamanının KTP'den fazla olduğu söylenebilir. Büyük boyutlu problemlerde (P94-P148) optimal çözüme ulaşma açısından iki model de başarılıdır. Ancak büyük boyutlu problemlerde KP'nin KTP'ye göre daha hızlı olduğu söylenebilir. Hat etkinliği açısından P111 ve 27 istasyona sahip problem gibi bazı problemler dışında kabul edilebilir etkinlik değerleri elde edilmiştir.

4.4.2. Durum 2 sonuçları

Basit MHDP'ye verilen istasyon ve uzaklık kısıtlarının (Bkz. Çizelge 4.3) eklenmesiyle elde edilen problemler bu durum başlığı altında çözülmüştür. Çizelge 4.5'te sonuçlar rapor edilmiştir. KTP tüm problemler için optimal çözüme ulaşırken, KP P75 ve 15 istasyon sayısına sahip test problemi dışında tüm problemlerde optimal çözüme ulaşmıştır. CPU zamanı açısından her iki modelin de aynı performansı gösterdiği söylenebilir. Bunun nedeni istasyon kısıtları ile birlikte uzaklık kısıtları çözüm uzayını daraltmış ve modellerin

daha hızlı şekilde sonuca ulaşmasına neden olmuştur. Bu yüzden iki modelden birinin diğerine daha üstün olduğunu söylemek mümkün değildir.

Çizelge 4.4. Durum 1 için test sonuçları

Problem	İstasyon sayısı	KTP		KP		Hat etkinliği
		c	CPU	c	CPU	
P25	4	32	0,32	32	0,13	0,98
	8	17	0,49	17	0,21	0,92
P35	9	55	1,72	55	2,23	0,98
	14	40	0,85	40	0,56	0,86
P45	4	138	0,26	138	0,29	1,00
	10	56	0,45	56	0,40	0,99
P58	10	155	3,11	155	1,58	1,00
	17	92	240,60	92	227,00	0,98
P75	15	100	90,80	101	10 000,00	0,98
	22	69	5,46	69	123,67	0,97
P89	19	26	10,79	26	33,39	0,95
	28	19	86,47	19	1,58	0,91
P94	16	268	1 126,00	268	682,79	0,98
	26	171	13,63	171	1,47	0,95
P111	13	11 573	10 000,00	11 573	22,65	1,00
	27	9 210	25,86	9 210	1,93	0,60
P148	10	564	4,79	564	4,67	1,00
	15	494	9,11	494	0,85	0,76
Ortalama			95,34	65,02		

Çizelge 4.5. Durum 2 için test sonuçları

Problem	İstasyon sayısı	KTP		KP		Hat etkinliği
		c	CPU	c	CPU	
P25	4	32	0,28	32	0,20	0,98
	8	16	0,21	16	0,14	0,98
P35	9	56	0,21	56	0,16	0,96
	14	40	0,44	40	0,18	0,86
P45	4	138	0,19	138	0,36	1,00
	10	56	0,36	56	0,33	0,99
P58	10	160	0,68	160	0,32	0,97
	17	95	2,28	95	1,65	0,96
P75	15	100	12,41	101	10 000,00	0,98
	22	72	0,50	72	0,39	0,95
P89	19	29	0,67	29	0,67	0,88
	28	21	3,22	21	4,67	0,82
P94	16	284	1,59	284	4,63	0,93
	26	171	2,50	171	0,50	0,95
P111	13	13 715	121,00	13 715	27,21	0,84
	27	11 188	0,69	11 188	0,28	0,50
P148	10	564	1,75	564	5,06	1,00
	15	501	2,74	501	5,55	0,75
Ortalama			8,43	3,08		

Hat etkinliği açısından bazı problemlerde Durum 1'e göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Örneğin, P89'da hat etkinliği durum 1'de sırasıyla 0,95 ve 0,91 olarak bulunurken, durum 2'de ise 0,88 ve 0,82 olarak tespit edilmiştir. Bunun nedeni modele ilave kısıtların eklenmesidir. Problem için çevrim zamanları durum 1'de sırasıyla 26 ve 19 olarak bulunurken, durum 2'de 29 ve 21 olarak bulunmuştur. Çevrim zamanlarındaki bu artış hat etkinliğinin daha düşük elde edilmesine neden olmuştur.

4.4.3. Durum 3 sonuçları

Verilen tüm atama kısıtları (Bkz. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3) MHDP'ye eklenerek durum 3 problemleri elde edilmiştir. Test sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir. P75 problemi dışındaki test problemleri için optimal çözüme ulaşılmıştır. KP ise P75 problemi için 10 000 saniye çalışma zamanı içerisinde uygun bir çözüm değerini (104) 0,96 hat etkinliği ile elde etmiştir. Hesaplama zamanı açısından hiçbir model diğerinden daha iyi değildir. Ayrıca atama kısıtı eklemenin hesaplama zamanını düşürdüğü yine görülmektedir. Hat etkinliği açısından durum 1 ve 2'deki benzer durumlar durum 3 için de geçerlidir.

Çizelge 4.6. Durum 3 için test sonuçları

Problem	İstasyon sayısı	KTP		KP		Hat etkinliği
		c	CPU	c	CPU	
P25	4	36	1,12	36	0,10	0,87
	8	18	0,22	18	0,14	0,87
P35	9	56	0,23	56	0,20	0,96
	14	42	0,23	42	0,19	0,82
P45	4	138	0,24	138	0,39	1,00
	10	58	0,27	58	0,15	0,95
P58	10	160	0,64	160	0,38	0,97
	17	96	6,85	96	1,71	0,95
P75	15	N/A	N/A	104	10 000,00	0,96
	22	75	0,53	75	0,89	0,91
P89	19	32	0,83	32	0,32	0,80
	28	21	2,32	21	4,68	0,82
P94	16	284	2,44	284	6,77	0,93
	26	171	5,88	171	36,85	0,94
P111	13	13 715	1 834,00	13 715	1 785,46	0,84
	27	11 188	0,77	11 188	0,29	0,50
P148	10	564	1,87	564	4,72	1,00
	15	581	0,76	581	5,43	0,65
Ortalama			109,37		108,75	

4.5. Tartışma ve Sonuç

Basit MHDP'ye atama kısıtları eklemenin mümkün görev atama kombinasyonu sayısında azalmaya neden olacağını söylemek mümkündür. Bu kısıtların çözüm sayısı üzerindeki etkisi öncelik diyagramının etkisine benzerdir. Ayrıca optimal çözüm ve optimal görev atama kombinasyonu bu kısıtların eklenmesi ile değişiklik gösterebilir. Bu kısıtların eklenmesi problemdeki kısıt ve değişken sayısında da etkili olmaktadır (Scholl, 1999). Bilinen bir matematiksel programlama özelliği, bir modelde değişken sayısının düşmesinin problemin çözümünü kolaylaştıracağını söylemektedir (Bazara ve Jarvis, 1977: 39, 66). KP bu avantajı KTP'ye göre daha iyi kullanmaktadır. Üstelik KP, KTP'ye nazaran herhangi bir atama kısıtı olmaksızın dahi daha fazla kısıt kullanmaktadır. KP'nin bu avantajını ortaya koyabilmesi için problemin KP modelinin çok iyi bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu anlatılan durumları Çizelge 4.7'de görmek mümkündür.

Çizelge 4.7. Atama kısıtları olmaksızın MHDP için KTP ve KP modellerinin karşılaştırılması

Problem	İstasyon sayısı	KTP				KP			
		0-1 değişken sayısı	Kısıt sayısı	C	CPU	Tam sayı değişken sayısı	Kısıt sayısı	C	CPU
P25	4	102	65	32	0,31	26	190	32	0,24
	8	202	73	16	0,55	25	298	16	0,27
P35	9	317	98	54	1,22	36	448	54	0,85
	14	492	108	40	2,00	36	633	40	0,40
P45	4	182	115	138	0,49	46	340	138	0,26
	10	452	127	56	0,45	46	622	56	0,41
P58	10	582	148	155	8,75	59	786	155	0,36
	17	988	162	92	1 384,26	59	1 206	92	1 675,87
P75	15	1 127	192	100	4,00	76	1 392	100	8 250,35
	22	1 652	206	69	4,01	76	1 931	69	13,36
P89	19	1 693	145	26	28,43	90	2 025	26	6,76
	28	2 494	263	18	13,26	90	2 844	18	7,54
P94	16	1 506	307	268	123,52	95	1 905	268	975,28
	26	2 446	327	171	16,72	95	2 865	171	2,41
P111	13	1 445	313	11 573	2 382,03	112	1 867	11 573	37,82
	27	2 999	341	5 689	23,12	112	3 449	5 689	8,39
P148	10	1 482	343	564	4,56	149	1 971	564	3,72
	15	2 222	353	383	3,97	149	2 721	383	1,05
Ortalama					222,31				610,30

Amaç fonksiyonu açısından, atama kısıtı olmayan basit MHDP, AKMHDP için bir alt sınırdır. Genel anlamda KP ve KTP'nin problem çözümlerine ulaşmada iyi performans sergilediği söylenebilir. Fakat KTP durum 3'te P75 için hesaplama zamanı sınırı içinde

optimal çözüme ulaşamamıştır. Ayrıca KP modelinin durum 1 ve 2’de P75 için optimal çözüme ulaşamadığı görülmektedir.

Hat etkinliği değeri atama kısıtları eklendikçe düşer. Bunun nedeni Eş. 4.11 kullanılarak hesaplanan hat etkinliğinde çevrim zamanının payda da yer almasıdır. Atama kısıtlarının eklenmesi ile çevrim zamanı artmakta bu nedenle de hat etkinliği düşmektedir.

Her iki modelin de küçük boyutlu problemlerde benzer performanslar sergilediği söylenebilir. Orta büyüklükteki problemler için, atama kısıtı eklendikçe CPU zamanının azaldığı görülmektedir. Bazı problemler dışında büyük boyutlu problemlerde de atama kısıtı eklenmesi CPU zamanında azalmaya neden olmaktadır. Atama kısıtları KP modelinde karar değişkenlerinin çözüm kümesinde önemli ölçüde değişikliklere neden olduğundan dolayı, KP’nin çözüme daha hızlı yakınsadığı söylenebilir. Çizelge 4.8’de hesaplama zamanı açısından her bir durum için geliştirilen modellerin üstünlükleri rapor edilmiştir. Özellikle küçük boyutlu problemlerde her iki model de neredeyse eşit hesaplama zamanları sergilemişlerdir. Diğer problemler için KP’nin sadece durum 1 için KTP’den daha hızlı çözümler verdiği söylenebilir. Ancak diğer durumlarda da KP’nin iyi performans sergilediği görülmüştür. Genel olarak problem büyüklüğüne bağlı olmakla birlikte, KP modelinin AKMHDP’nin çözümünde kullanılmasının anlamlı ve etkili sonuçlar verdiği söylenebilir.

Çizelge 4.8. Geliştirilen modellerin hesaplama zamanı açısından üstün oldukları örnek sayıları

	Durum 1	Durum 2	Durum 3
Neredeyse eşit	8	11	9
KP daha hızlı	7	2	4
KTP daha hızlı	3	5	5

Tez çalışmasının bu bölümünde MHDP için bir KP modeli önerilmiştir. Önerilen model uyumlu, uyumsuz, istasyon ve uzaklık kısıtları da eklenerek geliştirilmiştir. Verilen bir istasyon sayısı için çevrim zamanı en küçüklenmesi amaç fonksiyonudur. Birçok kombinatoryal problemin çözümünde kullanılan KP, MHDP problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. KP modelinin performansı literatürdeki örnek problemler ile test edilmiştir. Sonuç olarak KP modelinin özellikle büyük boyutlu problemlerde KTP’ye kıyasla kabul edilebilir performans sergilediği görülmüştür.

5. STOKASTİK MONTAJ HATTI Dengelemede Değişkenliğin Modellemesi

MHDP görev sürelerine göre genel olarak deterministik ve stokastik olarak ikiye ayrılmaktadır (Bkz. Bölüm 2.1.2). Deterministik hatlarda görev süreleri belirli sabitlerdir. Ancak gerçek hayatta görev süreleri değişken olabilmektedir. Makine arızaları, motivasyon kaybı, eğitim eksikliği, kalifiye olmayan operatörler, karmaşık işler vb. nedenlerden dolayı hatta değişken bir yapı meydana gelir. Bu değişkenlik görev sürelerinin bir olasılık dağılımına uygun şekilde stokastik özellik göstermesine neden olur. Stokastik görev zamanlı bu tür problemler stokastik montaj hattı dengeleme problemi (SMHDP) olarak adlandırılır.

5.1. Montaj Hatlarında Değişkenlik

Montaj hatlarının bir akış tipi imalat yöntemi olduğu göz önünde bulundurulduğunda, stokastik olarak modellenebilir bir üretim sistemi de olduğu söylenebilir. Keza literatürde akış tipi imalat sistemlerinin stokastik olarak modellendiği çalışmalar çok fazla bulunmaktadır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda SMHDP’de stokastikliğin sadece görev sürelerinde ortaya çıkan bir olgu olduğu kabul edilmektedir. Ancak stokastik üretim modellemede değişkenlikten kaynaklanan stokastikliğin etkisi sadece görev sürelerinde ortaya çıkmamaktadır. Bu yüzden, Shanthikumar, Ding ve Zhang (2007) değişkenliğin etkisini iki şekilde sınıflandırmaktadır: *işlem süreci değişkenliği ve akış süreci değişkenliği*.

- İşlem süreci değişkenliği görev sürelerinin değişkenliği ile ifade edilir.
- Akış süreci değişkenliği ise hatta rastgele ürün gelişleri ve hızlı talep değişkenliklerinden kaynaklanır. İşlem süreci ve akış süreci (geliş süreci ve çıkış sürecinden oluşur) hakkında detaylı bilgi Bölüm 2.2’de verilmiştir (Bkz. Şekil 2.3). Sonraki bölümde ise üretimde değişkenlik detaylı olarak ele alınacaktır.

SMHDP literatürü incelendiğinde bu iki tür değişkenlik etkisinin birlikte ele alındığı MHDP ele alınmamıştır. Bu nedenle bu bölümde stokastik ortamda MHD ve hattın performans değerlendirmesi arasındaki ilişki üzerinde durulacaktır. KP ve kuyruk ağları entegrasyonu ile elde edilen yeni bir çözüm prosedürü önerilmiştir. Performans

parametreleri olarak ortalama istasyon kullanım oranı ile hattaki ortalama iş sayısı kullanılmıştır.

5.2. Değişkenliğin Tanımlanması

Teorem 2.2.1’de belirtildiği üzere, bir üretim sisteminde $\text{çıkıtı hızı} = \text{çevrim zamanı} / \text{WIP}$ eşitliği ile tespit edilir. Burada kısa çevrim zamanı ve minimum WIP istenilen durumdur. Ancak eşitlik de yüksek çevrim zamanı ve yüksek WIP de aynı çıktı hızını üretebilir. Bu duruma neden olan ise değişkenliktir. Değişkenlik genellikle rastgelelik ile karıştırılsa da aynı şey değildir. Üretim sistemlerinde birçok özellik değişkenlik ile ilgilidir ve performans üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. İşlem süreleri, makine arızaları, kalite ölçümleri, malzeme özellikleri, hazırlık zamanları gibi birçok özellik sayılabilir (Hopp ve Spearman, 2000: 248).

Değişkenlik katsayısı bir rastgele değişkenin standart sapmasının ortalamasına bölünmesi ile elde edilen birimsiz göreceli bir ölçüttür. Genellikle değişkenlik katsayısının İngilizce baş harfleri olan cv (Coefficient of variation) ile gösterilir. μ bir rastgele değişkenin ortalaması, σ standart sapması olmak üzere, cv aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$cv = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5.1)$$

Özellikle stokastik performans değerlendirmede çoğu zaman daha uygun olan değişkenlik katsayısının karesi (cv^2) kullanılır.

$$cv^2 = \frac{\sigma^2}{\mu^2} \quad (5.2)$$

Değişkenlik katsayısının sınırları için birçok öneri bulunsa da Hopp ve Spearman (2000), düşük $cv < 0,75$, orta $0,75 < cv < 1,33$ ve yüksek $cv \geq 1,33$ olarak tanımlamıştır. Ancak üretim sistemlerinde yapılacak olan istatistiksel ve deneysel çalışmalar sonucunda sistemin en doğru değişkenlik seviyesi belirlenebilecektir. Düşük ve orta seviye değişkenlik genellikle çan eğrisi şeklinde dağılım gösterir. Ancak yüksek seviye değişkenlik neredeyse

düzgün bir dağılıma sahip olmaktadır. Bu durum üretim sistemlerinin performansında kritik bir öneme sahiptir.

Değişkenliğin nedenleri doğal olmakla birlikte, kontrol edilemeyen birçok nedeninin olduğunu söylemek mümkündür. Makine arızaları, hazırlık zamanları, operatör uygunluğu, çevrimler gibi nedenler değişkenlik meydana getirebilir. Bu nedenlerin iyi anlaşılıp kontrol edilmesi üretim sistemlerinde daha iyi performans elde edilmesi ile doğrudan ilişkilidir (Hopp ve Spearman, 2000).

Önceki bölümde belirtildiği üzere, Shanthikumar ve diğerleri (2007) değişkenliğin etkisini işlem süreci ve akış süreci değişkenliği olarak sınıflandırmışlardır. İşlem süreci ürün üzerinde gerçekleştirilecek operasyonlar ile ilgili iken akış süreci sisteme gelişler ve çıkışlar ile ilgilidir.

- İşlem süreci değişkenliği, ürün veya operasyonlar için kullanılan ekipman kullanımından kaynaklanan görev zamanlarının değişkenliğinin bir sonucudur. Ayrıca beklenen veya beklenmeyen arızalar, hazırlık zamanları ve doğru gerçekleştirilemeyen kalite kontrol ölçümleri işlem süreci değişkenliğinin nedenlerindendir.
- Geliş süreci değişkenliği, hattaki istasyonlarda gerçekleştirilen görev ve operasyonlar ile ilgilidir. Yoğun trafikli akışlarda, değişkenlik ıskarta ürün, yeniden işleme veya beklemelerden dolayı artar. Stokastik geliş süreci değişkenliği sisteme gelen rastgele iş parçası gelişleri ve hızlı talep değişkenliklerinden doğar.
- Çıkış süreci değişkenliği, performans ölçümünde bir istasyondan çıkışlar ile ilgili bir diğer önemli ölçüttür. Stokastik üretim hatlarında doğru analizler yapabilmek için gelişler arası zaman özelliklerinin çıkışlar arası zaman özelliklerine dönüşümünün çok iyi tanımlanması gerekir. Kararlı durum şartlarında akışın korunumu kavramı dikkate alındığında, bir istasyona gelen ortalama geliş oranı o istasyondan çıkan ortalama çıkış oranına eşittir. Bu yüzden geliş süreci değişkenliği çıkış süreci değişkenliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Çıkış süreci değişkenliği işlem süreci ile geliş süreci değişkenliğinin bir sonucudur.

Değişkenlik bir montaj hattında hem işlem süreci hem de akış sürecini ilgilendiren önemli bir performans parametresidir. Değişkenlik her zaman sistem performansını olumsuz etkiler. Değişkenlik sonucunda üretim hatlarında istasyon önlerinde kuyruk oluşması

ve/veya istasyonların boş kalması (aç kalma) durumları ortaya çıkar. Yüksek değişkenlik uzun kuyruklar ve uzun çevrim zamanına neden olacaktır (Hopp ve Spearman, 2000: 251).

5.3. Kuyruk Ağları ile Montaj Hattı Dengeleme Arasındaki Teorik İlişki

Tez çalışmasının ana amaçlarından biri montaj hatlarında ortaya çıkan değişkenliğin kuyruk ağları ile modellenmesidir. Bölüm 2.2’de anlatıldığı üzere, bir kuyruk ağı şu üç ana süreçten oluşmaktadır (Bkz. Şekil 2.4a): geliş süreci (λ ile gösterilir), işlem süreci ($1/\mu$ ile gösterilir) ve çıkış sürecidir (istasyon sonundaki ok ile gösterilir). Bu sistem dışsal gelişlerin sadece hattın ilk istasyonuna geldiği tam seri bir sistemdir. İşlem zamanları istasyonlara atanan görevlerin gerçekleştirilmesi için gerekli süredir. Çıkış süreci sonraki istasyonlara doğru yönlendirilmiş akışlardır. Her bir istasyonun çıkış süreci sistem performansına etkisinden dolayı doğru bir şekilde nitelendirilmelidir. Yukarıda da belirtildiği üzere tüm sistem değişkenliği işlem ve akış süreci değişkenliklerinden oluşur. İşlem süreci değişkenliği, işlem süreci süresi ve onun değişkenlik katsayısını içerirken, akış süreci değişkenliği çıkış süresi ve onun değişkenlik katsayısından meydana gelir. Hat performansının ölçülebilmesi için bu değişkenliklerin belirlenmesi gerekir (Shanthikumar ve diğerleri, 2007)

Bu bölümde stokastik montaj hatları ile KA arasındaki ilişki ve teorik temeller üzerinde durulacaktır. Bu amaçla, çalışmada montaj hatlarının stokastik modellenmesi ile ilgili bazı önermelerde bulunulmuştur. Bir stokastik montaj hattında görev süreleri belirli bir istatistiksel dağılıma uyan rastgele değişken olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla görev sürelerinin birçok modelde aşağıdaki gibi dağıldığı dikkate alınır.

$$t_i \sim (\mu_i^t, \sigma_i^t) \quad \forall i \in T \quad (5.3)$$

Buradan yola çıkarak aşağıdaki önermede bulunulabilir.

5.3.1. Önerme

Bir stokastik montaj hattında, μ_i^t ortalama ve σ_i^t standart sapma parametreleri ile normal dağılıma sahip görev zamanları ($t_i \forall i \in T$) verilmiş olsun, görevler istasyonlara atandıktan

sonra, istasyon iş yükleri $t(S_k)$, μ_k^s ortalamaya, σ_k^s standart sapmaya ve cv_k^s değişkenlik katsayısına sahip normal dağılım olacaktır.

$$\mu_k^s = \sum_{i \in S_k} \mu_i^t \quad \forall k \in W \quad (5.4)$$

$$\sigma_k^s = \sqrt{\sum_{i \in S_k} (\sigma_i^t)^2} \quad \forall k \in W \quad (5.5)$$

$$cv_k^s = \sigma_k^s / \mu_k^s \quad \forall k \in W \quad (5.6)$$

İspat

Görev sürelerinin Eş. 5.3'e göre, istasyon k 'nın iş yükünün/süresinin $t(S_k) \sim (\mu_k^s, \sigma_k^s)$ şeklinde dağıldığı ve toplam $\|T\|$ adet görevin bulunduğu bir montaj hattında istasyonlara görev atamaları yapıldıktan sonra, n adet görevin k istasyonuna atandığı düşünülürse; istasyon iş yükü $t(S_k)$ 'nin μ_k^s ve σ_k^s parametreleri birer rastgele değişken olarak aşağıdaki gibi belirlenir ($E[\bullet]$ ortalama değeri, $V[\bullet]$ varyansı göstermek üzere).

Toplam istasyon iş yükünün ortalaması μ_k^s , n adet rastgele değişkenin ortalamalarının toplamı,

$$\begin{aligned} E[t(S_k)] &= E[t_1 + t_2 + \dots + t_n] \\ &= E[t_1] + E[t_2] + \dots + E[t_n] \end{aligned} \quad (5.7)$$

şeklinde hesaplanır. Buradan,

$$\mu_k^s = \mu_1^t + \mu_2^t + \dots + \mu_n^t$$

olarak hesaplanır.

Toplam istasyon iş yükünün varyansı σ_k^s ,

$$\begin{aligned}
V[t(S_k)] &= E\left[\left(t(S_k) - E[t(S_k)]\right)^2\right] \\
&= E\left[t(S_k)^2\right] - E[t(S_k)]^2 \\
&= E\left[(t_1 + t_2 + \dots + t_n)^2\right] - (E[t_1] + E[t_2] + \dots + E[t_n])^2 \\
&= \sum_{i=1}^n E[t_i^2] + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n E[t_i t_j] - (E[t_1] + E[t_2] + \dots + E[t_n])^2 \\
&= \sum_{i=1}^n (E[t_i^2] - E[t_i]^2) + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n (E[t_i t_j] - E[t_i]E[t_j]) \\
&= \sum_{i=1}^n V[t_i] + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n cov[t_i, t_j]
\end{aligned} \tag{5.8}$$

dönüşümü ile hesaplanır. Eğer rastgele değişkenler aralarında bağımsız ise, $cov[t_i, t_j]$ kovaryans ifadesi sıfıra eşit olur. Bu durumda Eş. 5.8 $V[t(S_k)] = \sum_{i=1}^n V[t_i]$ ifadesine dönüşür. Böylece toplam istasyon iş yükü $t(S_k)$ değişkeninin standart sapması,

$$\sigma_k^s = \sqrt{\sum_{i \in S_k} (\sigma_i^t)^2}$$

ifadesine eşit olur.

cv_k^s ise Eş. 5.1 kullanılarak standart sapmanın ortalamaya bölünmesi (σ_k^s / μ_k^s) ile hesaplanır. Temelde Önerme 5.3.1, Brady ve Drury (1969) tarafından ortaya atılan teoremden yola çıkılarak geliştirilmiştir. Bu teoremden bir kümeye yeni bir eleman eklenmesi ile elde edilecek değişkenlik katsayısının ilk değişkenlik katsayısından düşük olacağı gösterilmiştir. Bu yüzden görevlerin istasyonlara atanması ile rastgele değişkenler olarak ifade edilen görev zamanı dağılımlarının toplamı ile daha düşük değişkenlikler ve daha düzgün dengeler elde edilebilecektir.

5.3.2. Önerme

Kuyruk ağının geliş oranı teorik çevrim zamanının tersi olan gelişler (talepler) arası oran ve bir değişkenlik katsayısı ile tanımlanabilir.

$$\lambda \sim (1/ct, cv_A^2) \quad (5.9)$$

İspat

Montaj hatlarında birbirini takip eden iş parçaları sabit geliş aralıkları ile hatta giriş yapmaktadır. Bu gelişler deterministik hatlar için çevrim süresine eşittir. Ancak stokastik hatlarda, iş parçaları ilk istasyonun aç kalma durumundan kaçınmak için farklı geliş aralıkları ile hatta giriş yapabilmektedir (Scholl, 1999). Yukarıda bahsedilen stokastik akış sürecinden dolayı, hatta iş parçası gelişler arası zamanı bir değişkenliğe (cv_A^2) sahiptir. Buradan gelişler arası zamanın ortalaması $1/\lambda$ ve değişkenliği cv_A^2 olan bir genel dağılıma uyduğu söylenebilir.

5.3.3. Önerme

Seri olarak yerleştirilmiş bir montaj hattı gelişler arası zaman ve istasyon zamanlarının genel dağılım olduğu G/G/1 kuyruk ağı olarak modellenebilir.

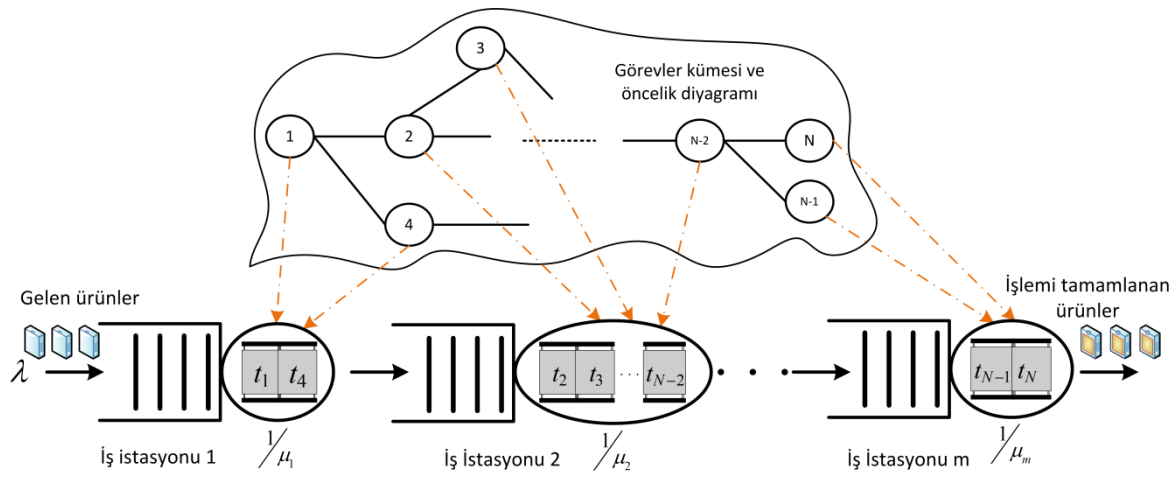
İspat

Matematiksel olarak kolay modellenebilmesinden dolayı araştırmacıların çoğu işlem zamanlarını üssel dağılım olarak kabul etmişlerdir. Bu varsayım üssel dağılımın yüksek değişkenliğe sahip olmasından dolayı gerçek hayat uygulamalarına uygun değildir. Bu nedenle genel (deneysel) dağılım olarak bilinen sistemde yapılan ölçümler sonucunda verilerin herhangi bir dağılıma uymaksızın bir ortalama ve standart sapma ile ifade edildiği dağılımlar, işlem ve geliş süreçlerini modellemek için çok kullanışlıdır (Lagershausen, 2013). Bu durumda montaj hattı G/G/1 formunda bir kuyruk ağı olarak modellenebilir. Bu ağlarda gelişler arası zaman ile istasyon zamanları genel dağılıma uymaktadır.

Kuyruk ağları ile MHDP arasındaki temel kavramsal çerçeve Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Montaj hattında her bir istasyon kuyruk ağındaki bir düğüm olarak temsil edilmiştir. Ancak bu istasyonlarda yapılacak görevler belirli değildir. Ayrıca hatta iş parçası gelişleri de kuyruk ağlarının geliş ve çıkış süreçleri ile ifade edilmiştir. Verilen bir istasyon sayısına sahip hatta görevlerin kısıtlara uygun şekilde istasyonlara atanmasından sonra performans

değerlendirme yöntemi olarak kuyruk ağı yaklaşımı çalıştırılacak ve en iyi performanslı hat tasarımı belirlenecektir.

Çalışmanın temel araştırma sorusu, hat dengesinin tüm değişkenlik tipleri de dikkate alındığında nasıl değiştiğini tespit etmektir. Hat tasarım aşamasında belirlenen standart görev süreleri değişmektedir. Bu yüzden istasyonlara atanacak görev karışımları da zamanla değişebilmektedir. Eğer görev zamanları, zamanla bir değişkenlik gösterirse, tekrar görev ataması hat performansının artırılması için gerekli olacaktır (Buzacott ve Shanthikumar, 1993: 75, 167).



Şekil 5.1. Montaj hatları ve kuyruk ağları arasındaki kavramsal çerçeve

5.4. Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Önerilen Model

Üretim sistemlerinin stokastik olarak modellenmesi hakkındaki literatür incelendiğinde, iş yükü atama problemleri verilen toplam iş yükünün belirli üretim aşamaları arasında mümkün olduğunca eşit olacak şekilde dağıtılması problemleri olarak karşımıza çıkar. Örneğin, toplam iş yükünden w_i (üretim aşaması i 'nin ortalama işlem süresi) kadarının i aşamasına tahsis edilmesidir. Bu problemlerde görevler ve toplam görev süreleri istenilen şekilde bölünebilir kabul edilmektedir. Bu problem MHDP'ye benzemesine rağmen, görevlerin bölünebilirliği ve probleme özgü kısıtların (öncelik ilişkileri, atama kısıtları gibi) dikkate alınmaması yönünden MHDP'den farklıdır. Ayrıca iş yükü atama problemlerinde istasyonlara atanacak görevler önceden belirlenmiştir. Tez çalışmasında iş yükü ve istasyonlara görev atama kısıtları MHDP kısıtları da dikkate alınarak eş zamanlı ele alınmıştır. Elde edilen hat tasarımı kuyruk ağları ile değerlendirilmiş ve amaç

fonksiyonunu en iyileyecek hat tasarımı belirlenmiştir. SMHDP için önerilen matematiksel model aşağıdaki gibidir.

Amaç fonksiyonu;

$$EnKüçük SI = \sqrt{\sum_{k=1}^{|W|} (\rho_{\max} - \rho_k)^2} \quad (5.10)$$

Kısıtlar;

Eş. 4.3, Eş. 4.5 ve

$$\sum_{i=1}^{|T|} x_{ik} \geq 1 \quad \forall k \in W \quad (5.11)$$

$$\frac{1}{\mu_k^s} \geq \sum_{i=1}^{|T|} \mu_i^t \cdot x_{ik} \quad \forall k \in W \quad (5.12)$$

$$\sigma_k^s = \sqrt{\sum_{i=1}^{|T|} x_{ik} \cdot (\sigma_i^t)^2} \quad \forall k \in W \quad (5.13)$$

$$cv_k^s = \sigma_k^s / \mu_k^s \quad \forall k \in W \quad (5.14)$$

$$\rho_k = f \left\{ \lambda, (\mu_1, \mu_2, \dots), (cv_1, cv_2, \dots) \right\} \quad \forall k \in W \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} x_{ik} &\in \{0,1\} & \forall (i,k) \in (T,W) \\ \rho_k &\in \mathbb{R} & \forall k \in W \end{aligned} \quad (5.16)$$

Modelde MHDP'nin temel iki amacı çevrim zamanı veya istasyon sayısı en küçüklemesinden farklı olarak istasyon kullanım oranlarının eşit dağıtılması amaç olarak dikkate alınmıştır. Bu sayede istasyon iş yükü dağılımının da verilen bir gelişler arası zaman değeri ile düzgün dağıtılması sağlanacaktır. Keza, kullanım oranı formülünde (Bkz. Çizelge 2.2) yer alan μ ifadesi görev atamaları yapıldıktan sonra istasyon iş yükü

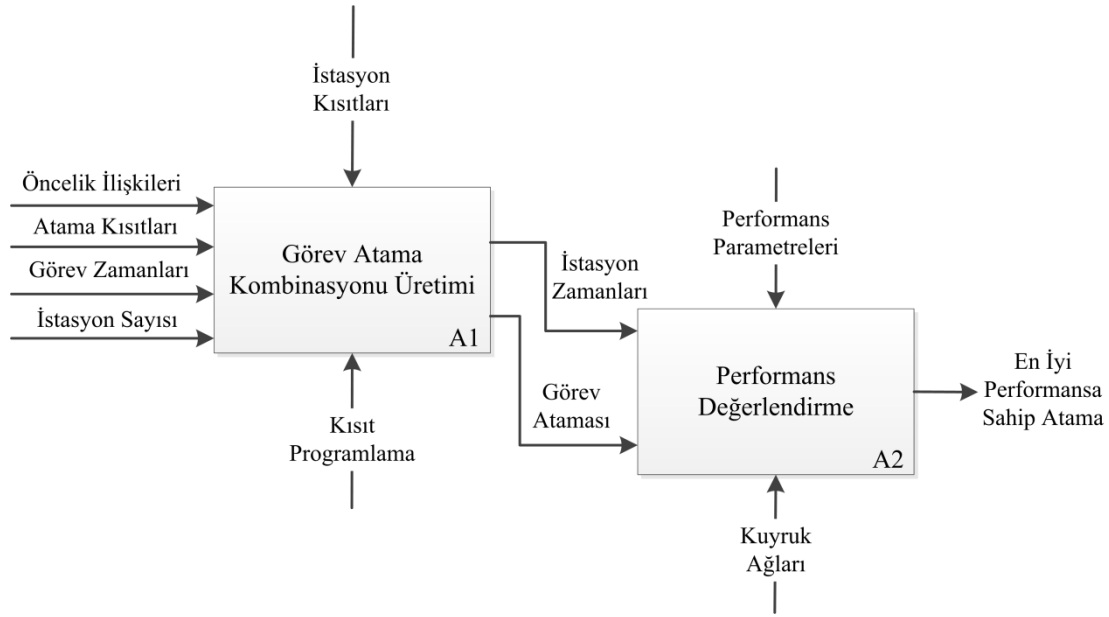
ortalaması olan μ_k^s 'ya karşılık gelmektedir. Kullanım oranlarının düzgün dağılmasını sağlamak için Scholl (1999) tarafından önerilen düzgünlük indeksi (SI) kullanılmıştır. Eş. 4.3 ve Eş. 4.5 sırası ile her görevin bir istasyona atanması ve öncelik kısıtlarını ifade eder. Eş. 5.11 her istasyona mutlaka bir görev atanmasını garanti eder. Eş. 5.12, Eş. 5.13 ve Eş. 5.14 istasyon zamanlarının ortalaması, varyansı ve değişkenlik katsayıları ile ilgilidir. Bu ifadeler Önerme 5.3.1'e dayanılarak hesaplanır. Eş. 5.15 gelişler arası oran, işlem oranları ve değişkenlik katsayısı parametreleri ile ifade edilen amaç fonksiyonu ile ilişkilidir. Bir istasyonda kullanım oranı arttıkça, istasyondaki ortalama ürün sayısı (WIP) ile çevrim zamanı artacaktır. Bu sebeple maksimum kullanım oranı ve minimum WIP elde etmek için hat iş yükü dağılımı dengeli olarak gerçekleştirilmelidir. Bu açıdan görev atama problemi dengeleme problemi ile ilişkilidir.

Önerilen model stokastik, doğrusal olmayan bir optimizasyon problemidir. Amaç fonksiyonu olan kullanım oranının görev zamanı parametreleri ile ilişkili olacak şekilde ifadesine yönelik yaklaşımlar zor ve karmaşıktır.

5.5. Önerilen Çözüm Prosedürü

Problemin çözümü için KP ve KA'nın birlikte kullanıldığı bir prosedür geliştirilmiştir. Bu iki yöntem arasındaki ilişki diyagramı Şekil 5.2'de verilmiştir. Prosedürde istasyonlara mümkün görev atamaları KP kullanılarak üretilmektedir (blok A1). Öncelik ilişkileri, atama kısıtları, görev zamanları ve istasyon sayısı A1 bloğunun girdileridir. A1 bloğunun çalıştırılması ile elde edilen istasyon zamanları (Önerme 5.3.1'den faydalanılarak) ve görev atama kombinasyonu, A2 bloğunda KA performans değerlendirme yaklaşımı ile değerlendirilmektedir. Üretilen tüm atama kombinasyonları bu şekilde değerlendirildikten sonra en iyi performans değerine sahip görev atama kombinasyonu belirlenmektedir.

Önerilen çözüm prosedürünün detaylarına geçmeden önce, ilerleyen bölümlerde kullanılan KP ve KA modelleri hakkında bilgi verilecektir.



Şekil 5.2. Önerilen çözüm prosedürü

5.5.1. Kısıt programlama modeli

Çözüm prosedüründe MHDP için uygun görev atama kombinasyonlarını üretmek için KP modelinden faydalanılmıştır. Kullanılan KP modeli Bölüm 4.3'te geliştirilen modelden atama kısıtlarının çıkarılmasıyla elde edilen basit MHDP modelidir. Modelde karar değişkeni Eş. 4.12'te verildiği gibidir. Kısıtlar ise basit MHDP için, öncelik ilişkileri (Eş. 4.13), istasyon atama kısıtları (Eş. 4.14) ve en erken E_i ve en geç L_i istasyon numarası kısıtlarıdır. E_i ve L_i değerleri sırası ile Eş. 5.17 ve Eş. 5.18 kullanılarak hesaplanırlar. E_i ve L_i değerleri karar değişkenlerinin çözüm kümelerinin önceden belirli olması için modele kısıt olarak eklenmiştir (Eş. 5.20 ve Eş. 5.21). KP, karar değişkenlerinin çözüm kümesi aralığının önceden tanımlanması durumunda daha hızlı çözümler üretebilmektedir (IBM, 2013b).

En erken istasyon numarası: Görev i 'nin atanabileceği en düşük istasyon numarasıdır.

$$E_i \leq \left\lceil \frac{\left(\mu_i^t + \sum_{h \in P_i^*} \mu_h^t \right)}{ct} \right\rceil \quad \forall i \in T \quad (5.17)$$

En geç istasyon numarası: Görev i 'nin atanabileceği en büyük istasyon numarasıdır.

$$L_i \leq \|W\| + 1 - \left\lceil \frac{\left(\mu_i^t + \sum_{h \in F_i^*} \mu_h^t\right)}{ct} \right\rceil \quad \forall i \in T \quad (5.18)$$

Burada ct teorik çevrim zamanının alt sınır değerini göstermektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$ct = \max \left(\max(\mu_i^t), \frac{\sum_{i=1}^{|T|} \mu_i^t}{\|W\|} \right) \quad (5.19)$$

Önerilen KP modeli aşağıdaki gibidir.

Amaç fonksiyonu;

EnKüçük Eş. 5.10

Kısıtlar;

Eş. 4.13, Eş. 4.14

$$İstasyonNumarası[Görev_i] \geq E_i \quad \forall i \in T \quad (5.20)$$

$$İstasyonNumarası[Görev_i] \leq L_i \quad \forall i \in T \quad (5.21)$$

Modelde amaç fonksiyonu sonraki bölümde anlatılacak olan performans değerlendirme modelinin KP modeline entgre edilmesi ile hesaplanmıştır. Eş. 4.14 kısıtının sağlanması için Bölüm 4.3'te bahsedilen *count* fonksiyonu kullanılmıştır.

5.5.2. Performans değerlendirme modeli

Elde edilen görev atama kombinasyonunun performansı bir kuyruk ağları tekniği olan difüzyon yaklaşımı (DA) ile değerlendirilmiştir. Sistemdeki ortalama ürün sayısı ve

istasyon kullanım oranları performans parametresi olarak seçilmiştir. Performans değerlendirmesi ile en iyi performansı gösteren atama kombinasyonu belirlenmiştir.

Çalışmada montaj hattındaki görev zamanlarının bir ortalama ve standart sapmaya sahip genel dağılıma uyduğu varsayılmıştır. İstasyonlara atanan görevlerin süreleri toplamı ile istasyon iş yükleri elde edilmiştir (Önerme 5.3.1). Her bir istasyon kuyruk ağının bir düğümünü temsil etmek üzere, Önerme 5.3.3'e dayanarak montaj hattı sıralı topolojiye sahip bir G/G/1 açık KA olarak modellenmiştir.

DA, sonsuz bekleme yeri kapasitesine, genel dağılımlı gelişler ve işlem sürelerine sahip merkezi limit teoremine dayalı olarak geliştirilmiş bir yaklaşım algoritmasıdır. Kobayashi (1974a) ve Reiser ve Kobayashi (1974) DA'nın olasılık yoğunluk fonksiyonunu Önerme 5.3.1'e dayanarak ortaya koymuşlar ve genel DA algoritmasını sunmuşlardır. DA türetilmesi çok zor ve karmaşık olsa da, uygulanması kolay bir yaklaşımdır. Gelişler arası zaman ve her bir düğümün kullanım oranı her bir düğümde tek işlemci varsayımı ile belirlenirken çok sınıflı KA modelleri için DA uygun değildir (Bolch ve diğerleri, 2006).

Genel zamanlı kuyruk modelleri için kullanılan DA, literatürde çeşitli uygulama alanlarında performans değerlendirme için kullanılmıştır. Bunlar, ATM ağları (Kobayashi ve Ren, 1993; Ren ve Kobayashi, 1993), bilgisayar ağlarının değerlendirilmesi (Czachórski, Grochla, Nycz ve Pekergin, 2010; Kobayashi, 1974a, 1974b), havaalanı kuyruk analizleri (Lovell, Vlachou, Rabbani ve Bayen, 2013) ve esnek imalat sistemleri (Yao ve Buzacott, 1985) olarak örneklendirilebilir.

Genel dağılımlı geliş ve işlem zamanlarına sahip bir sistem için DA algoritması aşağıdaki gibidir.

Algoritma 2: Performans değerlendirmesi için difüzyon yaklaşımı

Adım 1: Her bir düğüm için kullanım oranlarını hesapla

$$\rho_k = \frac{\lambda \cdot e_k}{\mu_k^s} \quad \forall k \in W \quad (5.22)$$

Adım 2: Her bir düğüm için gelişler arası zamanın değişkenlik katsayısını hesapla

$$cv_{Ak}^2 = 1 + \sum_{j=0}^{\|W\|} \left(cv_{Ej}^2 - 1 \right) p_{jk}^2 \cdot e_j \cdot e_k^{-1} \quad \forall k \in W \quad (5.23)$$

Adım 3: Kullanım oranlarını güncelle

$$\hat{\rho}_k = \exp \left(- \frac{2(1 - \rho_k)}{cv_{Ak}^2 \cdot \rho_k \cdot cv_{Ek}^2} \right) \quad \forall k \in W \quad (5.24)$$

Adım 4: Her bir düğümdeki ortalama ürün sayısını hesapla

$$\bar{K}_k = \frac{\rho_k}{1 - \hat{\rho}_k} \quad \forall k \in W \quad (5.25)$$

Algoritmada gelen iş parçalarının bir istasyonu ziyaret etme oranı olan $e_k, \forall k \in W$ montaj hatlarının tam seri sistem özelliği nedeniyle her istasyon için birdir. Yani bir istasyona gelen iş parçasının kendinden sonraki istasyona geçmekten başka şansı yoktur. Bu yüzden birbirini takip eden istasyonlar arasındaki rota olasılığı her zaman bire eşittir. Ayrıca yaklaşım modelinin etkin olarak çalışabilmesi için hatta gelen trafiğin çok yoğun olmaması gerekir. Bu durum trafik yoğunluğu (ti) denklemi ile ifade edilmektedir (Eş. 5.26). Bu denklem yoğun hat yüklemelerinde hattın bloke olmasını önlemek için gerekli olan önemli bir sonuçtur. $ti > 1$ olduğu durumlarda hatta olan gelişlerin ortalama sayısı, hattın maksimum işlem verebileceği geliş sayısını geçecektir. Bu durumda hattın kararlı durum şartları bozulacak ve hatta bloke veya darboğaz durumları ortaya çıkacaktır. Bu yüzden hattın kararlı durum şartlarına ulaşmasını sağlamak için $ti < 1$ olmak zorundadır.

$$ti = \frac{\lambda}{\mu} \quad (5.26)$$

5.5.3. Çözüm prosedürü

Bu bölümde MHD ve performans ölçümü için önerilen çözüm prosedürü adım adım anlatılacaktır. Prosedür boş bir görev atama ve performans ölçütü dizisi ile başlar. Görev

atama dizisi hangi görevin hangi istasyona atandığını gösteren bir dizidir. Performans ölçütü dizisi DA algoritması ile elde edilen amaç değerlerini ifade eden dizidir. Prosedür KP ile üretilen bir başlangıç görev ataması (A_0) ile başlar ve bu atamaya ait kuyruk yapısı için performans ölçütlerinin başlangıç değerleri (P_0) DA ile hesaplanır. Daha sonra A_0 ve P_0 en iyi performansa sahip görev ataması (A_B) ve en iyi performans (P_B) olarak atanır. KP ile yeni bir görev ataması (A_N) üretilir ve DA çalıştırılarak performans ölçütleri (P_N) hesaplanır. Eğer P_N , P_B 'den iyi ise, P_N yeni en iyi performans olarak ve o anki görev ataması en iyi performansı veren görev ataması olarak atanır ($A_B = A_N$). Eğer P_N , P_B 'den iyi değil ise, yeni bir görev ataması üretilip, diğer adımlar tekrar edilir. Eğer KP yeni bir görev ataması üretmiyorsa, prosedür durdurulur ve en iyi performansa sahip görev ataması rapor edilir. Diğer durumlarda KP yeni uygun görev atamaları ürettiği sürece prosedür tekrar edilir.

Önceki bölümlerde verilen KP ve DA algoritmalarının (Algoritma 1 ve Algoritma 2) birleşimi ile elde edilen çözüm prosedürü aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Algoritma 3: Önerilen çözüm prosedürü

Adım 0. $P_0 = \emptyset$, $P_B = \emptyset$, $A_0 = \emptyset$, $A_B = \emptyset$

Adım 1. İlk görev atamasını üret A_0 ve DA ile P_0 hesapla.

Adım 2. $A_B = A_0$, $P_B = P_0$

Adım 3. KP modelini kullanarak yeni bir görev ataması üret A_N ve istasyon

zamanlarını $t(S_k) \forall k \in W$ belirle.

Adım 4. A_N için DA çalıştır.

Adım 5. A_N için performans ölçütlerinin değerlerini belirle (P_N).

Adım 6. Eğer $P_N > P_B$ ise $P_B = P_N$ ve $A_B = A_N$, değilse Adım 3'e git.

Adım 7. Eğer KP modeli ile üretilecek başka uygun görev ataması yok ise, Adım 8'e git, diğer durumlarda Adım 3'e git.

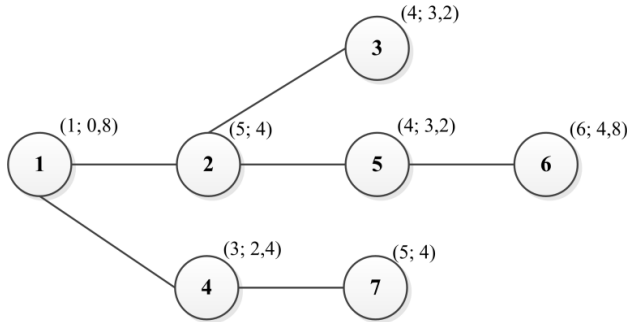
Adım 8. Prosedürü sonlandır ve en iyi performansa sahip sonuçları rapor et (A_B, P_B).

5.6. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde geliştirilen prosedür bir örnek problem üzerinde açıklandıktan sonra literatürde var olan test problemleri ile test edilecektir.

5.6.1. Açıklayıcı örnek

Bu bölümde Merten tarafından literatüre sunulan problem çözüm prosedürünün davranışlarını göstermek amacıyla detaylı olarak çözülecektir. Probleme ait görev zamanları ve öncelik diyagramı Şekil 5.3'te verilmiştir. Şekilde düğümlerin üzerindeki sayılar görev sürelerini ve standart sapmalarını ifade etmektedir. Tüm görev sürelerinin Çizelge 5.1'de verildiği gibi bir ortalama ve standart sapmaya sahip genel dağılım olduğu varsayılmıştır. İstasyon sayısı üç olarak kabul edilmiştir. Kuyruk ağı yapısı olarak sistemin bloke olmasını engellemek için gelişler arası zaman $1/\lambda = 18$ ve $cv_A^2 = 0,5$ olarak alınmıştır.



Şekil 5.3. Merten problemi için görev zamanları, görevlerin standart sapmaları ve öncelik ilişkileri

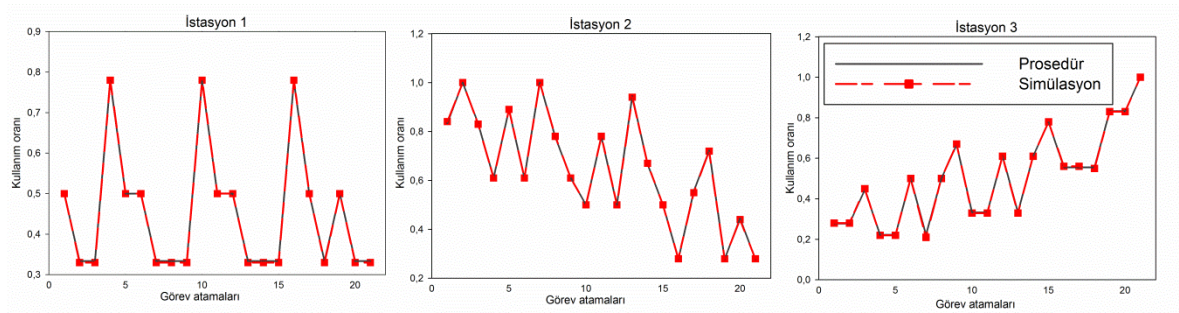
Önerilen çözüm prosedürü problem için 21 uygun çözüm üretmiştir. Her bir uygun çözümden elde edilen hat tasarımlarının ARENA simülasyon programında benzetimi yapılmıştır. İstatistiksel dengeye ulaşabilmek için her bir benzetim koşumu 10 kez tekrar edilmiş, her bir koşum 110 000 saat çalışma zamanı için yapılmış olup 10 000 saat ısınma süresi çalıştırılmıştır.

Elde edilen tüm uygun görev ataması için ortalama istasyon kullanım oranlarının çözüm prosedürü ve simülasyon karşılaştırması Şekil 5.4'te verilmiştir. Kullanım oranları sonuçları simülasyon ile çok yakın ve aynı görev atamasında benzer iniş ve çıkışlara sahip davranışlar göstermiştir.

Çizelge 5.1. Merten problemi için görev parametreleri ($cv = 0,8$)

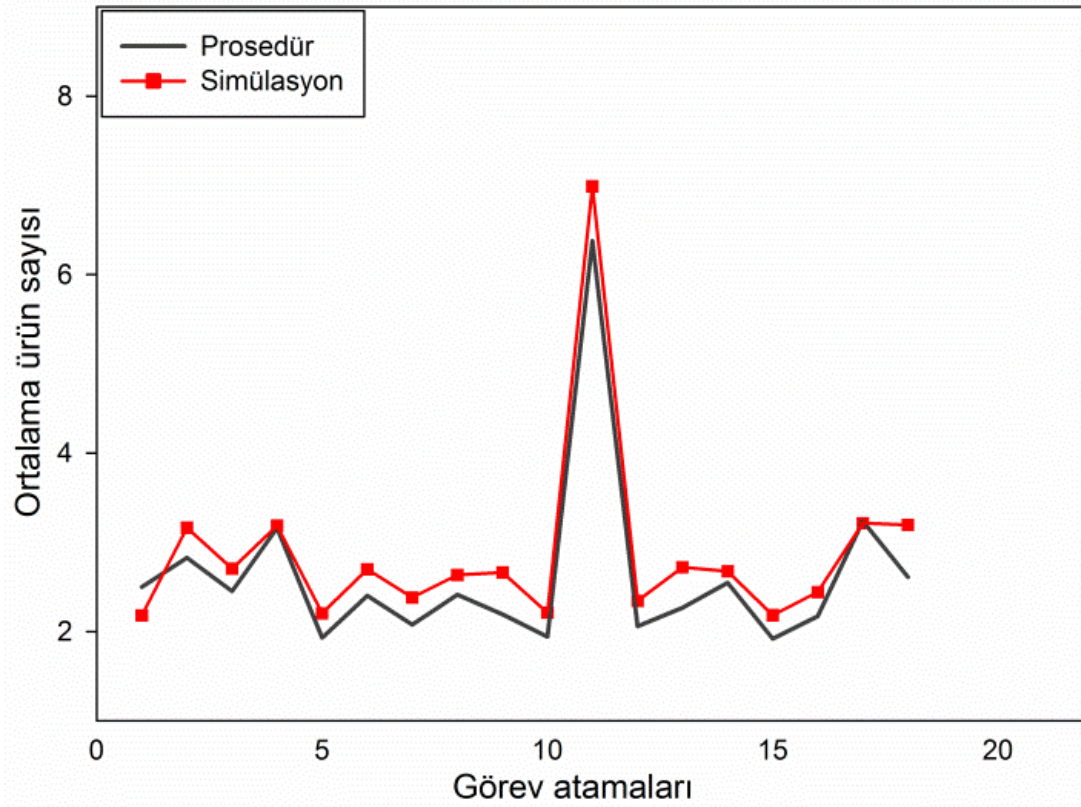
Görev	Ortalama görev zamanı	Görev standart sapması
1	1	0,8
2	5	4
3	4	3,2
4	3	2,4
5	4	3,2
6	6	4,8
7	5	4

Her iki modele ait sonuçların grafikleri üst üste kesişecek kadar yakın sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen model ile simülasyon arasında ortaya çıkan göreceli yüzde fark, % 0,278 olarak tespit edilmiştir. Bu fark her iki model sonuçları arasında dikkate değer bir fark olmadığını göstermektedir.



Şekil 5.4. Merten problemi için ortalama istasyon kullanım oranları karşılaştırması

Her bir görev ataması için hattaki ortalama ürün sayısı açısından simülasyon ve prosedürün karşılaştırması Şekil 5.5'te verilmiştir. Ortalama görev sayısının artmasından hat dengesi etkileneceği için, minimum görev sayısına sahip hat dengeli hat olmalıdır. Bu karşılaştırmada atama 2, 7 ve 21 için elde edilen hat tasarımları verilen λ değeri için trafik denklemini sağlamadığından, bu hatlarda ortalama görev sayısı sonsuz şekilde artmaya devam etmiştir. Bu durumda istasyon kullanım oranları bire eşit olacağı için DA değerlendirmesinde sıfıra bölünme hataları ortaya çıkar ve prosedür hata verir. Bu yüzden bu görev atamaları Şekil 5.5 oluşturulurken dikkate alınmamıştır. Simülasyon ve önerilen prosedür arasındaki göreceli yüzde fark ortalama ürün sayısı açısından % 9,103 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. Merten problemi için ortalama ürün sayısı karşılaştırması

Üretilen görev atama kombinasyonlarından elde edilen düzgünlük indeksi sonuçlarının karşılaştırması Şekil 5.6'da verilmiştir. Minimum SI değeri 17'nci görev atamasında 0,055 olarak elde edilmiştir. Bu görev atamasında, istasyon 1'e görev 1, 2, 4; istasyon 2'ye görev 5, 7; istasyon 3'e görev 3, 6 atanmıştır. Bu istasyonların ortalama kullanım oranları sırası ile 0,5; 0,556 ve 0,556 olarak hesaplanmıştır. Ortalama istasyon iş yükleri ise 9, 10 ve 9 olarak tespit edilmiştir. Minimum SI elde edilmesi ile görev zamanları mümkün olduğu kadar eşitlenmiş ve hat dengesi sağlanmıştır.

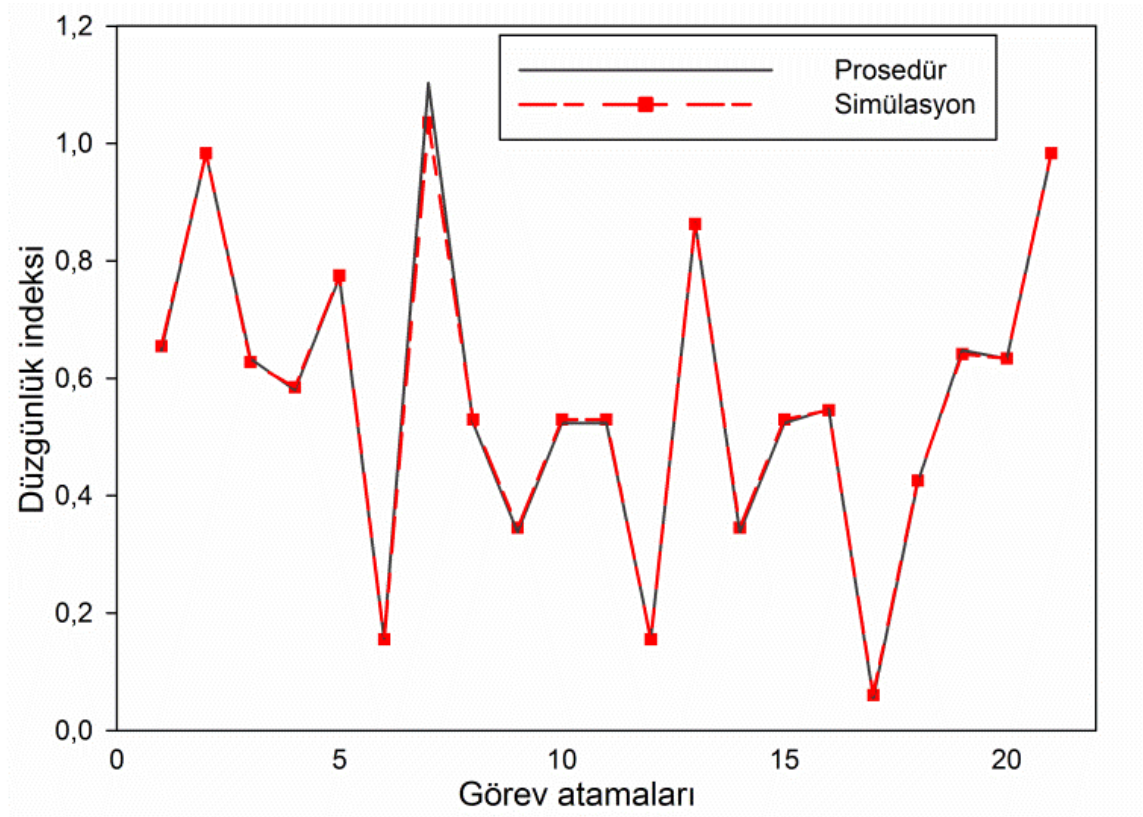
Bu sonuçlar stokastik montaj hatlarının performans değerlendirmesinin kuyruk ağları ile yapılarak dengeli bir tasarımının elde edilebileceğini göstermiştir.

Herhangi bir problemde görev sayısı ve öncelik ilişkisi sayısı arttıkça, mümkün görev atama kombinasyonu sayısı da üssel şekilde artar. Bu yüzden simülasyon her bir farklı görev atama kombinasyonunun değerlendirilmesi için uygun değildir. Bu tür durumlarda, istatistiksel güvenilirlik için simülasyon modelinin birkaç kez her bir kombinasyon için çalıştırılması gerekir. Bu durumda simülasyonun çalışma zamanı çok uzun olacaktır.

Ayrıca açıklayıcı örnek önerilen prosedürün MHD ve performans ölçümünde simülasyona yakın etkinliğe sahip bir yöntem olduğunu göstermiştir.

5.6.2. Deney tasarımı ve sonuçlar

Bu bölümde, önerilen prosedürün etkinliğini test etmek için bazı sayısal deneyler yapılmıştır. Test problemleri Scholl (1993) çalışmasından alınmıştır. Test problemleri 7 ile 21 arasında görev sayısına ve 3 ile 7 arasında istasyon sayılarına sahiptir. Test problemlerindeki orijinal öncelik ilişkileri ve görev zamanları korunmuştur. Dört farklı değişkenlik katsayısı değeri deneylerde kullanılmıştır: 0,2; 0,5; 0,8 ve 1. Manitz (2008) görev sürelerinin değişkenlik katsayılarının birden küçük olmasının pratik uygulamalarla gösterildiğini belirtmiştir. Hatta herhangi bir bloke durumunun oluşmasını engellemek ve trafik yoğunluğu şartını sağlamak için gelişler arası zaman test problemleri için hesaplanan teorik çevrim zamanından (Eş. 5.19) büyük alınmıştır. Ayrıca talepler arası zaman için bir değişkenlik katsayısı da söz konusudur. İncelenecek test problemleri için bu parametreler Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.6. Merten problemi için düzensizlik indeksleri karşılaştırması

Çizelge 5.2. Sayısal deney parametreleri

Problem	Toplam görev zamanı	Maksimum görev zamanı	İstasyon sayısı	Teorik çevrim zamanı
Merten	28	6	3	9
			4	7
			5	6
Jaeschke	37	6	3	12
			4	9
			7	5
Jackson	45	7	3	15
			4	11
			5	9
Mitchell	105	13	3	35
			5	21
			8	13

Çizelge 5.3'teki Merten üç istasyona sahip problem için sonuçlar dikkate alındığında toplam 21 görev atama kombinasyonundan aynı SI değerine sahip iki farklı atama bulunmuştur. $\lambda = 11$ için trafik denklemi sağlanmış ortalama istasyon kullanım oranı 0,879 olarak tespit edilmiştir. Farklı cv değerleri için, aynı kullanım oranları elde edilmiştir. Bu durum herhangi bir kazanç kaybının olmadığı seri sistemlerde beklenen bir durumdur ve geliş oranı hattın çıktı hızına eşittir.

Verilen test problemleri için sonuçlar Çizelge 5.3 ile Çizelge 5.6 arasında verilmiştir. En iyi performansa sahip görev ataması ve performans değerleri belirtilmiştir. cv değeri arttıkça düzgünlük indeksi ve kullanım oranları değişmezken, sistemdeki ortalama ürün sayısı artmaktadır. Jackson 3 istasyona sahip ve Mitchell 3 ve 5 istasyona sahip test problemleri için düzgünlük indeksi sıfıra eşit olduğundan mükemmel hat dengesi elde edilmiştir. Değişiklik yine ortalama ürün sayılarında gerçekleşmiştir. Bu durum ileriki bölümlerde tartışılacaktır. CPU zamanları da deney verisi olarak belirtilmiştir.

Çizelge 5.3. 7 görevli Merten problemi için sayısal sonuçlar

$cv_A^2 = 0,5$						
İstasyon sayısı	$1/\lambda$	cv	SI	$\bar{\rho}$	$\sum \bar{K}$	CPU zamanı
3	11	0,2	0,091	0,879	3,258	0,15
		0,5	0,091	0,879	4,981	0,15
		0,8	0,091	0,879	8,919	0,16
		1	0,091	0,879	12,607	0,16
	12	0,2	0,083	0,806	2,708	0,18
		0,5	0,083	0,806	3,319	0,15
		0,8	0,083	0,806	5,188	0,17
		1	0,083	0,806	7,001	0,15
	9	0,2	0,436	0,725	2,984	1,73
		0,5	0,436	0,725	4,520	0,89
		0,8	0,436	0,725	8,276	0,86
		1	0,436	0,725	11,855	0,80
4	10	0,2	0,396	0,659	2,665	0,82
		0,5	0,396	0,659	3,271	0,75
		0,8	0,396	0,659	5,244	0,79
		1	0,396	0,659	7,200	0,88
	8	0,2	0,395	0,725	3,942	1,62
		0,5	0,395	0,725	5,479	1,60
		0,8	0,395	0,725	9,501	1,48
		1	0,395	0,725	13,356	1,95
	9	0,2	0,351	0,644	3,348	1,55
		0,5	0,351	0,644	3,988	1,56
		0,8	0,351	0,644	6,199	1,53
		1	0,351	0,644	8,406	2,33

Çizelge 5.4. 9 görevli Jaeschke problemi için sayısal sonuçlar

$cv_A^2 = 0,5$						
İstasyon sayısı	$1/\lambda$	cv	SI	$\bar{\rho}$	$\sum \bar{K}$	CPU zamanı
3	15	0,2	0,240	0,822	2,964	0,08
		0,5	0,240	0,822	3,880	0,08
		0,8	0,240	0,822	6,181	0,08
		1	0,240	0,822	8,394	0,08
	16	0,2	0,225	0,771	2,599	0,10
		0,5	0,225	0,771	2,946	0,10
		0,8	0,225	0,771	4,135	0,09
		1	0,225	0,771	5,342	0,09
	11	0,2	0,203	0,841	3,990	0,90
		0,5	0,203	0,841	5,744	0,11
		0,8	0,203	0,841	10,012	0,11
		1	0,203	0,841	14,058	0,14
4	12	0,2	0,186	0,771	3,378	0,26
		0,5	0,186	0,771	4,010	0,11
		0,8	0,186	0,771	6,111	0,10
		1	0,186	0,771	8,195	0,11
	8	0,2	0,637	0,661	4,720	0,18
		0,5	0,637	0,661	6,312	0,17
		0,8	0,637	0,661	10,850	0,19
		1	0,637	0,661	15,265	0,19
	9	0,2	0,567	0,587	4,147	0,18
		0,5	0,567	0,587	4,816	0,19
		0,8	0,567	0,587	7,404	0,18
		1	0,567	0,587	10,041	0,19

Çizelge 5.5. 11 görevli Jackson problemi için sayısal sonuçlar

$cv_A^2 = 0,5$						
İstasyon sayısı	$1/\lambda$	cv	SI	$\bar{\rho}$	$\sum \bar{K}$	CPU zamanı
3	16	0,2	0,000	0,938	5,977	2,18
		0,5	0,000	0,938	8,025	1,73
		0,8	0,000	0,938	12,578	1,44
		1	0,000	0,938	16,832	1,85
	17	0,2	0,000	0,882	3,939	1,40
		0,5	0,000	0,882	4,672	1,40
		0,8	0,000	0,882	6,803	1,54
		1	0,000	0,882	8,857	1,84
	14	0,2	0,327	0,804	5,879	6,24
		0,5	0,327	0,804	6,696	4,49
		0,8	0,327	0,804	9,058	4,22
		1	0,327	0,804	11,389	6,09
4	15	0,2	0,306	0,750	4,062	6,04
		0,5	0,306	0,750	4,447	6,59
		0,8	0,306	0,750	5,840	4,41
		1	0,306	0,750	7,290	5,88
	11	0,2	0,241	0,818	4,721	15,24
		0,5	0,241	0,818	6,497	16,04
		0,8	0,241	0,818	11,118	16,02
		1	0,241	0,818	15,537	16,60
	12	0,2	0,220	0,750	4,045	16,35
		0,5	0,220	0,750	4,775	16,00
		0,8	0,220	0,750	7,293	17,96
		1	0,220	0,750	9,808	15,55

Çizelge 5.6. 21 görevli Mitchell problemi için sayısal sonuçlar

$cv_A^2 = 0,5$						
İstasyon sayısı	$1/\lambda$	cv	SI	$\bar{\rho}$	$\sum \bar{K}$	CPU zamanı
3	36	0,2	0,000	0,972	11,134	7,43
		0,5	0,000	0,972	14,040	6,80
		0,8	0,000	0,972	20,156	6,14
		1	0,000	0,972	25,846	5,86
	37	0,2	0,000	0,946	6,598	6,13
		0,5	0,000	0,946	7,731	7,56
		0,8	0,000	0,946	10,670	5,99
		1	0,000	0,946	13,465	6,11
5	22	0,2	0,000	0,955	9,539	132,76
		0,5	0,000	0,955	14,676	138,13
		0,8	0,000	0,955	25,585	128,95
		1	0,000	0,955	35,738	124,07
	23	0,2	0,000	0,913	6,599	132,19
		0,5	0,000	0,913	8,534	138,42
		0,8	0,000	0,913	13,731	130,90
		1	0,000	0,913	18,677	120,58

5.6.3. Tartışma ve çıkarımlar

Bu bölümde sayısal deneylerde edinilen bazı gözlemlerden bahsedilecek ve yönetimle ilgili bazı önerilerde bulunulacaktır. Yapılan analizlerde montaj hatlarının daha iyi dengelenmesi için bazı yorumlar ve bu yorumlardan doğacak sonuçlar tartışılmıştır. Son olarak hat performansını iyileştirmek için fabrika yönetimine bazı önerilerde bulunulmuştur.

5.6.1. Çıkarım

Değişkenlik montaj hattında optimal görev atamasını etkiler.

Çalışmada verilen bir gelişler arası ve servis zamanı değişkenlik katsayıları için uygun görev atama kombinasyonları araştırılmıştır. Bu yüzden farklı değişkenlikler için, dengeli

görev ataması en iyi performansa sahip atama olmayabilir. Bu yorum bu açıdan dikkate değerdir. Farklı cv kombinasyonları için farklı optimal görev atamaları bulunur. Çizelge 5.7’de bu durum gösterilmiştir.

5.6.1. Sonuç

Değişkenliğin artması ile optimal görev atamalarının değişmesi yönetimi tekrar montaj hattını dengelemeye zorlar. Eğer hat tasarımı değiştirilmez ve değişkenlik artarsa, hat performansı zamanla kötüye gidecektir. Hatta oluşan büyük ürün sayıları nedeniyle ürün teslim zamanları uzayacak, bu durum da müşteri memnuniyetini etkileyecektir.

Çizelge 5.7. Mitchell üç istasyonlu problem için farklı cv değerleri için optimal görev atamaları ($1/\lambda = 37$, $cv_A^2 = 0,8$)

cv	İstasyonlara atanan görevler		
	1	2	3
0,2	1,3,4,5,7	2,6,8,9,10,11,12,14,15,16	13,17,18,19,20,21
0,5	1,3,4,5,7	2,6,8,9,10,11,13,21	12,14,15,16,17,18,19,20
0,8	1,3,4,5,7	2,6,8,9,12,13,14,21	10,11,15,16,17,18,19,20
1	1,3,4,5,7	2,6,8,9,10,13,14,21	11,12,15,16,17,18,19,20

5.6.2. Çıkarım

Değişkenlik arttıkça hattaki ortalama ürün sayısı (WIP) da artar.

Sonuçlardan (Bkz. Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.6) kolayca görülebileceği gibi değişkenlik arttıkça ortalama ürün sayısı da artmıştır. Ayrıca görev zamanı değişkenliğinin gelişler arası zaman değişkenliğine göre performansı daha fazla etkilediği söylenebilir.

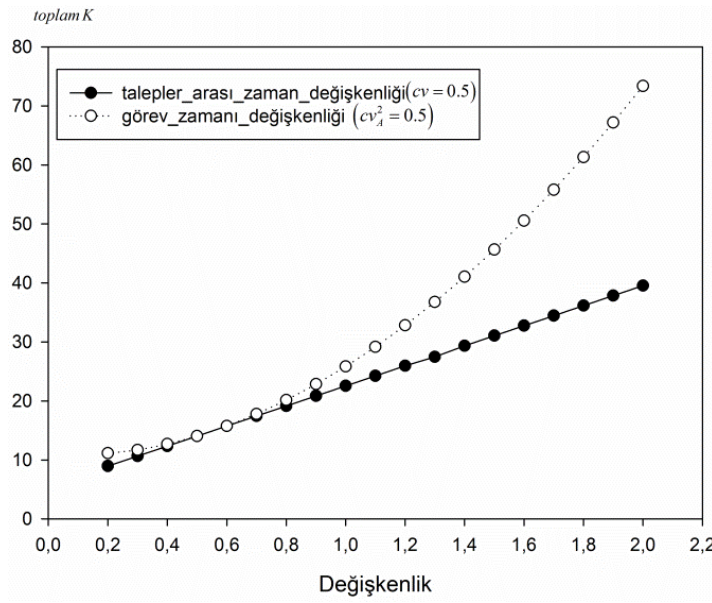
5.6.2. Sonuç

WIP seviyesinin yüksek olmasının bir dezavantajı ekonomik kayıplara sebep olmasıdır. Eğer WIP artarsa, üretim maliyetleri de artar. Fakat talepte oluşan hızlı değişikliklere cevap vermek için WIP seviyelerini ekonomik olarak kontrol etmek çok zordur. Bu nedenle, üretim sistemlerinde WIP kontrol stratejileri sıklıkla kullanılırlar.

5.6.3. Çıkarım

Görev zamanı değişkenliği performans üzerinde talepler arası zamanın değişkenliğinden daha etkilidir.

Talepler arası zaman değişkenliği arttıkça ortalama ürün sayısı doğrusal olarak artarken, görev zamanı değişkenliği arttığında ortalama ürün sayısı üssel olarak artmıştır (Şekil 5.7)

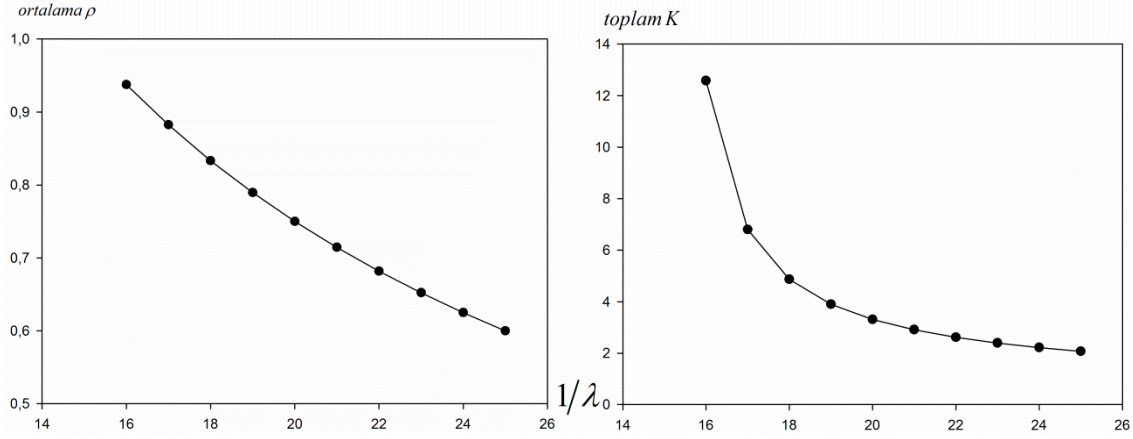


Şekil 5.7. Mitchell 3 istasyon için değişkenliklerin karşılaştırılması ($1/\lambda = 36$)

5.6.4. Çıkarım

Talepler arası zaman ($1/\lambda$) arttıkça, ortalama istasyon kullanımı ve hattaki toplam ürün sayısı azalır.

Her bir istasyon için kullanım oranı talepler arası geliş zamanı ile istasyon zamanlarının bölünmesi ile elde edilir ($\lambda/\mu_k \forall k \in W$). Hattaki ortalama ürün sayısı da direkt olarak kullanım oranından etkilenmektedir (Bkz. Algoritma 2). Bu nedenle talepler arası zaman azalırsa, performans ölçütleri ortalama kullanım oranı ve toplam ortalama iş sayısı da artar (Şekil 5.8).

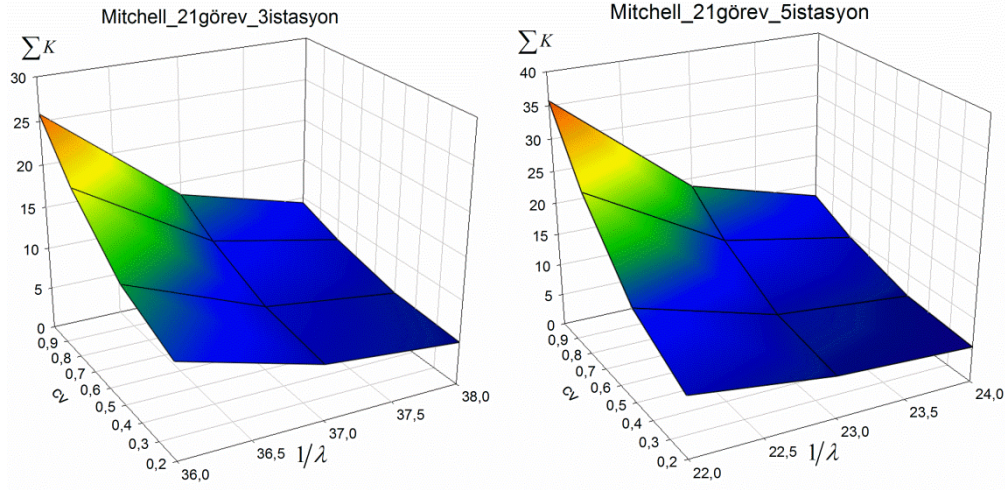


Şekil 5.8. Jackson 3 istasyonlu problemi için farklı talepler arası zaman için ortalama ürün sayısı ve kullanım oranları ($cv_A^2 = 0,5$, $cv = 0,8$)

Özellikle $1/\lambda$ ve cv arasındaki ilişki ortalama ürün sayısı üzerinde etkilidir. Daha önce de belirtildiği gibi cv değiştikçe kullanım oranları değişmemektedir. Ancak aynı $1/\lambda$ için, eğer cv artarsa, ortalama ürün sayısı da artacaktır. Bu durum Mitchell 21 görevli test probleminde 3 ve 5 istasyon için Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Toplam WIP artarken görev zamanı değişkenliği ve talepler arası gelişler de artmaktadır. Bu artış kullanım oranı bire yaklaştıkça büyük önem arz etmektedir. Sonuç olarak, dikkate değer bir WIP değişkenlik ve talepler arası oran arttıkça beklenebilir. Bu durum Bolch ve diğerleri (2006: 258) tarafından sunulan sonuçlar ile de benzerdir.

Bu çalışmanın ana konusu stokastik MHDP için hat dengelemesi ve performans değerlendirmesi yapmaktır. Değişkenliğin performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu konuda, üretim yönetimi birimlerine hat tasarımı açısından bazı önerilerde bulunulacaktır.

- Hat tasarımında ekonomik bir unsur olan yüksek WIP seviyelerinden kaçınmak için, montaj hatları kapalı kuyruk ağı modelleri olarak modellenebilir. Kapalı kuyruk ağlarında sistem içerisindeki ortalama ürün sayısı sabit olduğu için WIP kontrolü daha kolay olacaktır.
- Eğer hat tasarımının firmanın stratejik ve teknolojik kısıtlarından dolayı açık kuyruk ağı olarak modellenmesi gerekiyorsa, istasyonlar arasına ara stok eklemek WIP kontrolünü sağlayacaktır. Ara stoklar yüksek maliyetlerine rağmen, toplam üretim maliyetinde WIP maliyetine göre daha az etkilidir.



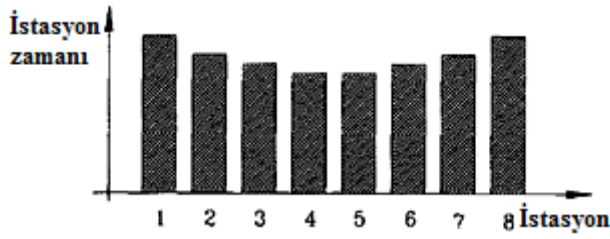
Şekil 5.9. Farklı cv ve $1/\lambda$ değerleri ile en iyi atamaların ortalama ürün sayısı kıyaslaması

- Talepler arası geliş zamanı direkt olarak istasyon kullanım oranlarını etkilemektedir. Bu yüzden isabetli talep tahminlerinin yapılması talepler arası geliş zamanlarının kontrolünde stratejik bir karardır. Etkili bir talep tahmini cv_A^2 değerini azaltacak veya sıfıra yaklaştıracaktır, böylece daha iyi performans değerleri ve düşük WIP seviyeleri elde edilebilecektir.

5.7. Montaj Hatlarında Çanak Etkisi

Bir montaj hattının çıktı oranı görev zamanının dağılımı ile ilgilidir. Eğer operasyon zamanları stokastik ise, hatlarda çanak etkisi oluşur. Çanak etkisi, optimal veya iyi bir hat tasarımında hattın ortasındaki istasyonların kullanım oranının baş ve sondaki istasyonlardan daha az olacak şekilde yerleştirilmesidir. Tipik bir çanak etkisi Şekil 5.10'da gösterilmiştir (Scholl, 1999).

Çanak şeklinde iş yükü dağılımını sağlamak için çıktı oranının belirlenmesi çok önemli bir adımdır. Stokastik hatlarda çıktı oranının belirlenmesinde simülasyon veya kuyruk teorisi kullanılabilir (Scholl, 1999). Çıktı oranındaki artış görev zamanı veya görev zamanı değişkenliği değiştirilerek çanak etkisi ile açıklanabilir.



Şekil 5.10. Tipik bir çanak etkisi

Literatürde çanak etkisini araştıran birkaç çalışma vardır. P. N. Rao (1976) deterministik ve üssel dağılımlı görev zamanlarına sahip bir seri üretim hattını çanak etkisi açısından incelemiştir. Eğer c_v 0,5'ten küçük ise çanak etkisinin, büyük ise değişkenlik dengesizliğinin ortaya çıktığını göstermiştir. Hillier ve So (1991) görev zamanlarının Coxian dağılım olduğu hatlar için optimum depolama alanı atamasında c_v değerinin etkisini incelemiştir. Elde edilen optimal çözümün genellikle çanak etkisi göstermekle beraber depolama alanı atandığında ters çanak etkisinin ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Das, Garcia-Diaz, MacDonald ve Ghoshal (2010) montaj hatlarında simülasyon kullanarak çanak etkisini araştıran son çalışmalardandır. Görev varyanslarının 1 ile 16 arasında olduğu normal ve üssel dağılımlı görev sürelerine sahip montaj hatlarını incelemiştir. Optimal çözümde normal dağılıma sahip hatlarda çanak etkisi, üssel dağılıma sahip hatlarda ters çanak etkisi görülmüştür.

Çalışmanın bu bölümünde Bölüm 5.3'te verilen matematiksel model ve Bölüm 5.4'te verilen çözüm prosedürü adımları kullanılarak görev zamanlarının c_v değerinin değişmesi ile ortalama istasyon kullanım oranı ve hattaki toplam ürün sayısı üzerindeki çanak etkisi incelenmiştir.

5.7.1. Görev zamanı değişkenliğinin etkisi

Montaj hatlarında işin karmaşıklığı, işçinin motivasyon ve tecrübesi gibi etkenlerden dolayı her bir görevin süresi farklı değişkenliklere sahip olabilir. Daha önceki bölümlerde her bir görev için sabit bir c_v değeri ile değişkenlik belirlenmişti. Bu bölümde test problemlerinin orijinal zamanları görevlerin ortalama zamanları olarak kabul edilirken, her bir görevin varyansı Carraway (1989) ve Özcan (2010) tarafından kullanıldığı şekilde rastgele üretilmiştir. Bu çalışmalarda yüksek seviye varyans için $(t_i / 2)^2$, düşük seviye için

ise $(t_i / 4)^2$ formüllerinden rastgele üretilmiştir. Buradaki varyans seviyeleri Eş. 5.1 verilen cv denklemine göre dönüştürüldüğünde, düşük seviye cv için $[0; 0,25]$, orta seviye cv için $[0; 0,5]$ ve yüksek seviye cv için $[0, 1]$ aralıkları kullanılmıştır. Her bir test problemi beş kez çözülmüştür. Bu beş çözümün ortalama performans değerleri rapor edilmiştir. Test problemi olarak Jaeschke, Jaskson ve Mitchell seçilmiştir.

Sonuçların rapor edildiği Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.10 incelendiğinde, hattaki ortalama ürün sayısının farklı cv seviyelerine göre değiştiği görülmektedir. Mitchell problemi dikkate alındığında, $\lambda = 22$ kabul edilirse, hattaki ortalama ürün sayısı düşük seviye değişkenlik için 9,418; orta seviye değişkenlik için 10,252 ve yüksek seviye değişkenlik için 20,422 olarak tespit edilmiştir. Değişkenlik arttıkça hattaki ortalama ürün sayısı artmıştır. Bu durum diğer test problemlerinde de söz konusudur.

Çizelge 5.8. Jaeschke problemi için test sonuçları ($cv_A^2 = 0,5$)

İstasyon sayısı	cv	$1/\lambda$	SI	$\bar{\rho}$	$\sum \bar{K}$	CPU zamanı
3	Düşük	14	0,258	0,881	-	0,140
		15	0,240	0,822	2,962	0,130
		16	0,225	0,771	2,593	0,220
	Orta	14	0,258	0,881	-	0,140
		15	0,240	0,822	3,035	0,740
		16	0,225	0,771	2,747	0,180
	Yüksek	14	0,258	0,881	-	0,200
		15	0,240	0,822	4,771	0,140
		16	0,225	0,771	2,981	0,190
4	Düşük	10	0,224	0,925	-	0,240
		11	0,203	0,841	3,961	0,240
		12	0,186	0,771	3,383	0,340
	Orta	10	0,224	0,925	-	0,250
		11	0,203	0,841	4,069	0,250
		12	0,186	0,771	3,411	0,290
	Yüksek	10	0,224	0,925	-	0,300
		11	0,203	0,841	9,706	0,290
		12	0,186	0,771	3,579	0,260
7	Düşük	7	0,728	0,755	-	0,900
		8	0,637	0,661	4,722	0,840
		9	0,567	0,587	4,138	0,770
	Orta	7	0,728	0,755	-	0,930
		8	0,637	0,661	4,854	1,130
		9	0,567	0,587	4,231	0,900
	Yüksek	7	0,728	0,755	-	1,090
		8	0,637	0,661	7,630	0,890
		9	0,567	0,587	5,777	1,040

Çizelge 5.9. Jackson problemi için test sonuçları ($cv_A^2 = 0,5$)

İstasyon sayısı	CV	$1/\lambda$	SI	$\bar{\rho}$	$\sum \bar{K}$	CPU zamanı
3	Düşük	16	0,000	0,938	5,903	11,240
		17	0,000	0,882	3,907	12,140
		18	0,000	0,833	3,182	12,280
	Orta	16	0,000	0,938	6,233	10,840
		17	0,000	0,882	3,960	12,570
		18	0,000	0,833	3,206	10,830
	Yüksek	16	0,000	0,938	10,673	10,850
		17	0,000	0,882	5,472	11,120
		18	0,000	0,833	3,618	9,680
4	Düşük	13	0,353	0,865	-	19,110
		14	0,327	0,804	5,827	25,040
		15	0,306	0,750	4,028	19,330
	Orta	13	0,353	0,865	-	19,580
		14	0,327	0,804	6,125	19,760
		15	0,306	0,750	4,041	19,390
	Yüksek	13	0,353	0,865	-	18,540
		14	0,327	0,804	8,181	19,550
		15	0,306	0,750	4,698	19,210
5	Düşük	10	0,265	0,818	-	21,660
		11	0,241	0,750	4,057	20,140
		12	0,220	0,692	3,603	20,900
	Orta	10	0,265	0,818	-	26,460
		11	0,241	0,750	4,338	20,860
		12	0,220	0,692	3,769	25,56
	Yüksek	10	0,265	0,818	-	26,53
		11	0,241	0,750	6,474	22,33
		12	0,220	0,692	4,989	20,02

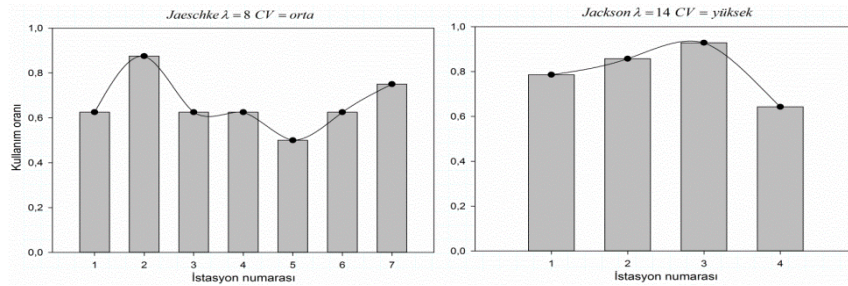
Çizelge 5.10. Mitchell problemi için test sonuçları ($cv_A^2 = 0,5$)

İstasyon sayısı	CV	$1/\lambda$	SI	$\bar{\rho}$	$\sum \bar{K}$	CPU zamanı
3	Düşük	36	0,000	0,972	11,073	19,030
		37	0,000	0,946	6,558	16,760
		38	0,000	0,921	5,028	20,310
	Orta	36	0,000	0,972	11,769	20,000
		37	0,000	0,946	6,742	19,100
		38	0,000	0,921	5,086	19,070
	Yüksek	36	0,000	0,972	14,840	18,380
		37	0,000	0,946	8,882	18,210
		38	0,000	0,921	6,034	25,290
5	Düşük	22	0,000	0,955	9,418	100,600
		23	0,000	0,913	6,589	105,490
		24	0,000	0,875	5,524	92,760
	Orta	22	0,000	0,955	10,252	106,660
		23	0,000	0,913	6,988	109,940
		24	0,000	0,875	5,574	108,040
	Yüksek	22	0,000	0,955	20,422	80,290
		23	0,000	0,913	8,544	112,580
		24	0,000	0,875	6,606	108,190

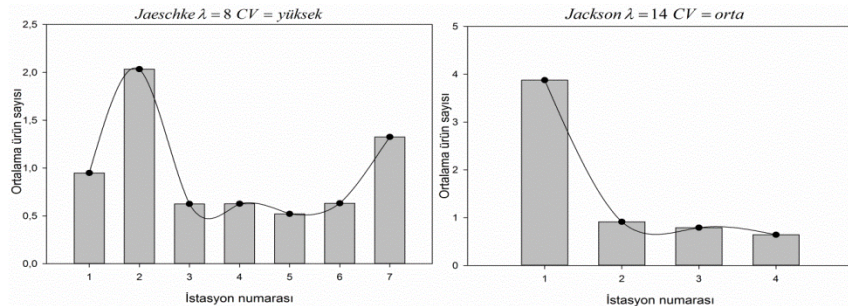
Yapılan test sonuçları Bölüm 5.5.3'te verilen sonuçlar ile benzerdir. İstasyon kullanım oranına etki eden parametre $1/\lambda$ talepler arası geliş zamanı olurken (Çıkarım 5.6.3), en iyi görev atama kombinasyonu farklı değişkenlik katsayısı ile birlikte değişmektedir (Çıkarım 5.6.1).

5.7.2. Çanak etkisinin tartışılması

Bu bölümde önceki bölümde elde edilen sonuçlar üzerinden çözüm prosedürünün çanak etkisi incelenecektir. Şekil 5.11'de Jaeschke ve Jackson problemleri için kullanım oranının çanak etkisini göstermektedir. Jackson problemi için ters çanak etkisi görülürken Jaeschke için değişkenlik dengesizliği görülmüştür. Bu durumu P. N. Rao (1976) yüksek değişkenliğe sahip bir istasyondan düşük seviye bir istasyona geçişte ortaya çıkan değişkenlik dengesizliği ile açıklamıştır. Bu problemler için ortalama ürün sayısının değişkenlik dengesizliği etkisi gösterdiği Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Benzer sonuçlar Mitchell test problemi için de görülmüştür.



Şekil 5.11. İstasyon kullanım oranlarında çanak etkisi



Şekil 5.12. Ortalama ürün sayısında çanak etkisi

İstasyonlar arasındaki değişkenlik istasyon zamanı dağılımı ve görev sürelerinin cv değerleri ile ilgilidir. Bir ürün yüksek cv seviyesine sahip bir istasyondan düşük seviye

olana doğru ilerlediğinde, hat yüksek değişkenli olabilir ve çanak etkisi ters veya değişkenlik dengesizliğine dönüşebilir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda çanak etkisinin istasyon kullanım oranları ve ortalama ürün sayıları üzerinde de etkili olduğu söylenebilir. Bu yüzden istasyon kullanım oranı ve ortalama ürün sayısının amaç olarak kabul edildiği MHDP anlamlı ve gerçekçi sonuçlar vermektedir.

6. STOKASTİK MONTAJ HATTI DENGELEME İÇİN BİR AYRIŞTIRMA MODELİ

Çalışmanın önceki bölümünde ele alındığı üzere MHDP’de temel amaç görevlerin istasyonlara, istasyon iş yüklerinin (yani verilen bir talepler arası geliş zamanı ile istasyon kullanım oranlarının) mümkün olduğunca dengeli olarak dağıtılmasıdır. Bu durum deterministik hatlar için kolaylıkla sağlanabilse de stokastik hatlarda görev sürelerinin belirsizliği (ya da değişkenliği) hat performansını da etkilemektedir. Hat çıktı hızının en iyilenmesi için hattaki iş parçası beklemelerinin (yani sistemdeki ortalama ürün sayısının - WIP-) de en küçüklenmesi gerekir.

Gerçek hayatta birçok işletme büyük WIP oranları ile karşı karşıyadır. Yüksek WIP seviyelerinin en büyük dezavantajı ekonomik olmamasıdır. Ani talep değişikliklerine karşı sistemin tepkisinin gecikmesi ve stok ihtiyaçlarının artmasından dolayı kalite problemlerinin ortaya çıkması WIP’in en önemli dezavantajlarından diğer bir tanesidir. Bu yüzden, üretim sistemlerinde sık sık WIP kontrolünü sağlamak için kanban kartları, tam zamanlı üretim, sınırlı bekleme yerleri gibi çeşitli stratejilere başvurulur (Curry ve Feldman, 2011: 128).

Bölüm 5’te önerilen modelde amaç fonksiyonu istasyon kullanım oranlarının dengelenmesi olarak kabul edilmişti. Ancak, Steck ve Solberg (1985) üretim hatlarında sadece kullanım oranının dengelenmesinin hat performansını iyileştirmede optimum bir yaklaşım olmadığını göstermişlerdir. Keza ileriki bölümlerde bahsedilecek olan stokastik performans değerlendirme yöntemlerinde kullanım oranı ve WIP birbiri ile ilişkili iki performans ölçütü olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple bu iki performans ölçütü arasında bir ödünleşimden bahsedilebilir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, dengeleme probleminde amacı WIP en küçüklemesi olarak ele alan bir çalışma Bitran ve Tirupati (1989)’ye aittir. Çalışmalarında açık kuyruk ağları ile istasyonlar arasındaki iş yükünün dengelenmesini sistemdeki WIP miktarını en küçükleyecek şekilde incelemişlerdir. Çalışmada iş yükü dağılımı dengelense de MHDP’nin temel varsayımları arasında olan öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı kısıtları ile görevlerin bölünemez oluşu dikkate alınmamıştır. Sistemde yapılması gereken toplam Y miktarındaki iş yükünün istasyonlara mümkün olduğunca eşit $y_k, \forall k \in W$ iş yüklerine dağıtılması ile ilgilenilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde stokastik hatlarda hat dengesini etkileyen WIP seviyesinin kontrolü ve en küçüklenmesi için ayrıştırma metoduna dayalı bir matematiksel model önerilmiştir. Ayrıştırma modelleri önceki bölümde ele alınan yaklaşımların (difüzyon yaklaşımı gibi) aksine sistem performansını iteratif bir algoritma kullanmak yerine kapalı form ifadelerle tespit edebilmektedir. Böylece daha büyük veya gerçek hayat problemlerine kabul edilebilir zamanlarda iyi çözümler elde edilebilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde stokastik montaj hatlarında WIP en küçüklemesi yapacak bir stokastik doğrusal olmayan matematiksel model önerilmiş ve kısıt programlama ile çözülüp test edilmiştir.

6.1. Ayrıştırma Metodu

Açık kuyruk ağlarının analizinde difüzyon yaklaşımı, maksimum entropi metodu gibi iteratif yaklaşımların yanı sıra parametrik ayrıştırma metodu özellikle sıralı sistemlerde kullanılmaktadır (Bolch ve diğerleri, 2006). Ayrıştırma metodunun üretim sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar Bitran ve Dasu (1992) ile Dallery ve Gershwin (1992) tarafından incelenmiştir. Ayrıştırma modellerinin genel gayesi; kapalı form eşitlikler ile sistemin geliş, işlem ve çıkış süreci parametrelerinin belirlenerek genel sistem performans ölçütlerinin hesaplanmasıdır. Ayrıştırma metodu bu analizi yaparken aşağıdaki;

- Geliş ve işlem süreleri ortalamaları ve standart sapmaları bilinen genel dağılıma uyarlar
- Kuyruk disiplini ilk giren ilk çıkar yapısındadır
- Kuyruk ağındaki düğümler tek işlemciye sahiptir
- Sistemde tek ürün sınıfı vardır

varsayımları kullanır.

Ayrıştırma metodu genel olarak aşağıdaki işlemler ile çalışır;

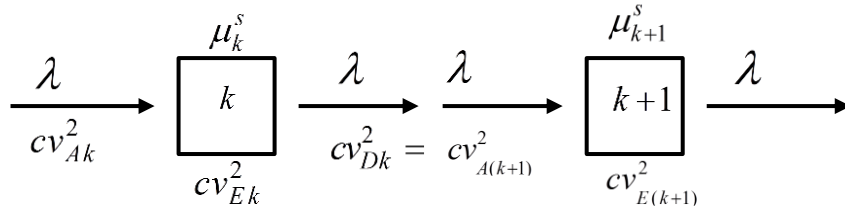
Adım 1: Her bir ağ düğümüne geliş oranları ve kullanım oranlarının belirlenmesi.

Adım 2: Gelişler arası zamanın değişkenlik katsayılarının belirlenmesi.

Adım 3: Performans ölçütlerinin hesaplanması.

Yukarıdaki işlemler incelendiğinde Bölüm 2.2’de belirtilen tipik bir kuyruk süreci parametrelerinin hesaplanması ile ilgili olduğu görülür (Bkz. Şekil 2.3). Ayrıştırma modelinin bu süreçler arasındaki ilişkisi Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Burada ağdaki tüm

düğümlemler tek tek ele alınarak tüm süreç parametreleri hesaplanır ve diğer düğümler arası ilişkiler belirlenir.



Şekil 6.1. İstasyonlar arası değişkenliğin etkisi

Geliş süreci hesaplamaları

Kuyruk ağlarında bir düğüme geliş süreci o düğüme gelen tüm gelişlerin toplamı olarak belirtilir. Bu gelişler Eş. 6.1 kullanılarak hesaplanır. Burada λ_k , k düğüme olan toplam akış; λ_{0k} , k düğüme olan dışsal (sistem dışından direkt olarak k düğüme gelen) akışları; p_{jk} ise j düğümünden çıkıp k düğüme gelen akışların rota olasılığını ifade etmektedir.

$$\lambda_k = \lambda_{0k} + \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot p_{jk} \quad k = 1, \dots, \|W\| \quad (6.1)$$

Montaj hatlarının doğal olarak tam seri sistemler olması nedeniyle bir istasyona (düğüme) diğer bir istasyondan geriye doğru bir geri dönüş olamaz. Yani $\lambda_k = 0$ ve rota olasılıkları ise sadece kendinden sonraki istasyona akışlar için 1 değerine diğer durumlar için sıfır değerine eşit olur ($p_{jk} = 1, \forall j, k = 1, \dots, \|W\|, k = j+1$ ve $p_{jk} = 0, \text{diğer durumlarda}$). λ_{0k} dışsal geliş ise sadece ilk istasyon için geçerlidir. Hattın diğer istasyonların işlem esnasında herhangi bir geliş söz konusu değildir. Dolayısıyla ilk istasyona olan geliş oranı ile tüm istasyonlar kendinden sonraki istasyonlar için geliş süreçlerini temin ederler. Bu yüzden tüm istasyonların geliş oranı ilk istasyona yapılan geliş oranına eşit olur ($\lambda_k = \lambda, k = 1, \dots, \|W\|$). İlk istasyonun geliş oranı Önerme 5.3.2’de açıklandığı şekilde belirlenir. Yani geliş oranı $\lambda \sim (1/ct, cv_{Ai}^2)$ parametreleri ile önceden belirlenmiş olarak sisteme girdi olarak verilir.

İstasyonlara olan geliş süreçleri ayrıca istasyonların kullanım oranlarını da etkilemektedir. Bu durum kullanım oranının $\rho_k = \lambda / \mu_k^s, k=1, \dots, \|W\|$ formülasyonu ile tespitinden kaynaklanmaktadır. Kullanım oranları trafik yoğunluk denkleminde dolayı $0 < \rho_k < 1$ şartını sağlamalıdır.

İşlem süreci hesaplamaları

Bir düğüme ait işlem süreci o düğüme ait ortalama işlem süresi ve işlem süresinin değişkenlik katsayısı karesi ile ilişkilidir. Montaj hatlarında bu parametrelerin belirlenmesinde Önerme 5.3.1 kullanılır. Verilen bir genel değişkenlik katsayısı ve bilinen görev zamanı ortalamaları kullanılarak, istasyonlara (düğümlere) yapılan bir görev atama kombinasyonu için istasyon iş yükü parametreleri Eş. 5.7 ve Eş. 5.8 kullanılarak hesaplanır. Bu parametreler sırası ile ortalama istasyon iş yükü μ_k^s , standart sapması σ_k^s ve değişkenlik katsayısı cv_{Ek}^2 olarak söylenebilir (Bkz. Şekil 6.1).

Çıkış süreci hesaplamaları

Ayrıştırma metodunun en önemli adımı bir düğümden çıkış sürecinin tespitidir. Çünkü bir düğümden çıkışlar kendinden sonraki düğüm için geliş sürecini teşkil edeceğinden parametre dönüşümlerinin doğru ve isabetli şekilde yapılması gerekir (Bkz. Şekil 6.1). Yani her bir düğüm ayrı ayrı ele alındığında düğüm i 'nin çıkış süreci parametreleri (λ, cv_{Dk}^2) , $k+1$ 'inci düğümün geliş parametreleri $(\lambda, cv_{A(k+1)}^2)$ olarak dönüştürülür. Burada kuyruk ağına ilk düğümden yapılan giriş oranı λ akışın korunumu kuralı ve montaj hatlarının seri yapısı gereği her düğüm için aynıdır. Ancak düğümler arası değişkenlik katsayısının kareleri parametresi için Eş. 6.2 kullanılarak düğümler arası geçiş hesaplanır.

$$cv_{Dk}^2 = \rho_k^2 \cdot cv_{Ek}^2 + (1 - \rho_k^2) \cdot cv_{Ak}^2 \quad \forall k \in W \quad (6.2)$$

Eş. 6.2, k düğüme gelişin çıkış süreci değişkenlik katsayısı karesine dönüşümünü verir. Ayrıştırma metodu her bir düğümü ayrı ayrı ele aldığından bu değişkenlik katsayısı karesi cv_{Dk}^2 , $k+1$ düğümünün geliş süreci değişkenlik katsayısı karesine eşit olur (Eş. 6.3).

$$cv_{Dk}^2 = cv_{A(k+1)}^2 \quad \forall k \in W \quad (6.3)$$

Çıkış süreci dönüşümleri hesaplanırken Eş. 6.2 ve Eş. 6.3'ten kaynaklanan bazı özel durumlar ortaya çıkabilir. Bu durumlardan biri kullanım oranlarının bire yakınsaması durumudur. Bu durumda ilgili istasyon neredeyse her an bir işlem ile meşgul oluyor demektir. Bu istasyondan çıkışlar arası zaman işlem zamanına eşit olacaktır. Böylece Eş. 6.2'de eşitliğin toplamdan sonraki ikinci terimi sıfıra eşit olacağından çıkışlar arası zaman değişkenlik katsayısının karesi işlem süresi değişkenlik katsayısının karesine eşit olacaktır ($cv_{Di}^2 = cv_{Ei}^2 = cv_{A(i+1)}^2$).

Kullanım oranının sıfıra yakınsaması durumu ise diğer bir özel durumdur. Bu durumda istasyon çok az yüklenmiş ve gelen her işe kısa bir sürede cevap veriyor demektir. İlgili düğüme bir başka gelişin olması için düğüm çok uzun süreler beklemek zorunda kalacaktır. Bunun nedeni işlem oranının geliş oranından büyük olmasıdır. Değişkenlik katsayısı karelerinin dönüşümünde Eş. 6.2'in toplamdan önceki parametresi sıfıra eşit olacağından, gelişler arası zaman cv_{Ak}^2 , çıkışlar arası zaman cv_{Dk}^2 'ye eşit olacaktır.

Performans ölçütlerinin belirlenmesi

Bir kuyruk ağ yapısında süreç parametreleri üssel dağılıma uyduğu durumda performans ölçütlerini tam olarak hesaplamak mümkündür. Ancak çalışmada dikkate alınan problemde süreç parametrelerinin genel dağılıma uyduğu kabul edildiği için yaklaşık performans hesaplanabilir. Tipik üretim problemlerinde süreç parametrelerinin üssel olduğuna çok nadir rastlanılmaktadır (Hopp ve Spearman, 2000).

Çalışmada genel performans parametreleri olarak sistemde bulunan ortalama ürün sayısı (WIP_k veya $\bar{K}_k, \forall k \in W$), bir ürünün sistemdeki beklediği süre ve sistemde geçirdiği toplam süre olarak belirlenmiştir. Teorem 2.2.1'e göre sistemdeki WIP , çıktı hızı θ ve ürünün sistemde geçirdiği toplam sürenin T çarpımı ile tespit edilir ($WIP = \theta \cdot T$). Bir ürünün sistemdeki geçirdiği toplam süre ise ürünün her düğümde kuyrukta bekleyerek geçirdiği zaman ($T_{qk}, \forall k \in W$) ve işlem süresinin (μ_k^s) toplamı ile tespit edilir ($T = T_{qk} + \mu_k^s$).

Bu durumlar dikkate alındığında eğer T_{qk} ve WIP_k hesaplanabilirse sistem çıktı oranı da belirlenebilir. Bu bağlamda bir stokastik montaj hattı gelişler ve işlem oranları genel dağılım olan bir kuyruk sistemi (G/G/1 sistemi) olarak kabul edilip modellenmiştir. Bu tür bir kuyruk ağı için Kingman (1961) kuyrukta geçen zaman için Eş. 6.4'teki yaklaşık formülü önermiştir.

$$T_{qk} = \underbrace{\left(\frac{cv_{Ak}^2 + cv_{Ek}^2}{2} \right)}_v \cdot \underbrace{\left(\frac{\rho_k}{1 - \rho_k} \right)}_u \cdot \underbrace{\mu_k^s}_t \quad \forall k \in W \quad (6.4)$$

Formül üç ayrı terimden oluşmaktadır. v değişkenliğin etkisini, u kullanım oranının etkisini ve t işlem zamanının etkisini göstermektedir. Eğer v bire eşit olursa sistem M/M/1 yapıda bir kuyruk sistemi özelliği sergiler. Bunun yanı sıra v birden büyük olursa sistem G/G/1 kuyruk sistemine doğru yakınsar.

Bir düğümdeki ortalama ürün sayısı WIP_k bir M/M/1 sistemi için $\rho_k / (1 - \rho_k)$ (yani u terimi kullanılarak) hesaplanır. Sistemdeki ortalama ürün sayısı ise her bir düğümdeki ortalama ürün sayısının toplamı ile bulunur ($WIP = \sum_{k \in W} WIP_k$). G/G/1 sistemleri için değişkenliğin etkisi ile Kingman formülü ve Little dönüşümü kullanılarak ortalama ürün sayısı yaklaşık olarak Eş. 6.5'deki gibi hesaplanabilir.

$$WIP_k = \left(\frac{cv_{Ak}^2 + cv_{Ek}^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{\rho_k^2}{1 - \rho_k} \right) + \rho_k \quad \forall k \in W \quad (6.5)$$

Literatürde T_q bekleme zamanı için alt ve üst sınır önerileri mevcuttur. Bu sınırlar geliştirilen modelin iyi çözümlere daha hızlı yakınsamasını sağlar. Bekleme zamanı için bilinen yaygın bir alt ve üst sınır aşağıda Eş. 6.6'da verilmiştir (Marchal, 1978; Marshall, 1968).

$$\frac{\rho_k^2 \cdot (1 + cv_{Ek}^2) - 2\rho_k}{2\lambda \cdot (1 - \rho_k)} \leq T_{qk} \leq \frac{\lambda \cdot (\sigma_{Ak}^2 + \sigma_{Ek}^2)}{2 \cdot (1 - \rho_k)} \quad \forall k \in W \quad (6.6)$$

Burada σ_{Ak}^2 gelişler arası oranın varyansını ve σ_{Ek}^2 işlem oranının varyansını ifade etmektedir. Amouzegar ve Moshirvaziri (2006) bu sınırların sadece $\rho_k < 1$ olduğunda geçerli olacağını belirtmiştir. Yüksek kullanım oranlarında ve $cv_{Ek}^2 > 1$ olmadığı sürece alt sınır negatif değerler alır. Ancak $cv_{Ek}^2 > 1$ olduğu durumlarda ise işlem zamanları çok daha fazla rastgeleliğe sahip olacaktır. Bu yüzden alt ve üst sınır her bir görev atama kombinasyonu üretildiğinde kullanılamamıştır. İleride bahsedileceği üzere alt ve üst sınırlar kullanılabilirdiği durumlarda önerilen modelin daha hızlı yakınsamasını sağlayacaktır. G/G/1 modeller için diğer bir alt sınır için Medhi (2002: 360) incelenebilir.

6.2. Önerilen Stokastik Model

Tez çalışmasının bu bölümünde montaj hatları için dengeleme problemi ve performans ölçümünü bütünleşik olarak gerçekleştiren doğrusal olmayan bir model önerilmiştir.

Amaç fonksiyonu;

$$EnKüçük \quad \sum_{k \in W} WIP_k \quad (6.7)$$

Kısıtlar;

Eş. 4.3, Eş. 4.5, Eş. 5.11, Eş. 5.12, Eş. 5.13 ve Eş. 5.14

$$\rho_k = \lambda / \mu_k^s \quad \forall k \in W \quad (6.8)$$

$$0 < \rho_k < 1 \quad \forall k \in W \quad (6.9)$$

$$\phi(\lambda, \mu_k^s, cv_{Ak}^2, cv_{Ek}^2) = 0 \quad \forall k \in W \quad (6.10)$$

$$WIP_k = \left(\frac{cv_{Ak}^2 + cv_{Ek}^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{\rho_k^2}{1 - \rho_k} \right) + \rho_k \quad \forall k \in W \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} x_{ik} &\in \{0, 1\} & \forall (i, k) \in (T, W) \\ \rho_k, WIP_k &\in \mathbb{R} & \forall k \in W \end{aligned} \quad (6.12)$$

Modelin amaç fonksiyonu hatta oluşan toplam ürün sayısını (WIP) en küçükleme (Eş. 6.7). Eş. 5.12, Eş. 6.4'teki t ifadesinin istasyona atanan görevlerin ortalama görev sürelerinin toplamı ile istasyon iş yükünün tespitini sağlar. Eş. 6.8 performans ölçütlerinin hesaplanması için gerekli olan istasyon kullanım oranlarının (Eş. 6.4'teki u) tespiti için kullanılır. Verilen bir geliş oranı λ ile istasyon kullanım oranlarını kısıtlayarak kararlı durum şartlarının bozulmaması için Eş. 6.9 kullanılır. Eş. 6.10 parametrik ayrıştırma modeli ile her bir istasyon için geliş, işlem ve çıkış süreci değişkenliklerinin tespiti için kullanılan denklem sistemlerini ifade eder (Eş. 6.4'teki v). Eş. 6.11 parametrik ayrıştırma yöntemi kullanılarak amaç fonksiyonunun belirlenmesi için kullanılır. Eş. 6.12 ise modelde kullanılan değişkenlerin tanım kümelerini belirler. Modelde Eş. 4.3, Eş. 4.5, Eş. 5.11 doğrusal kısıtları dışındaki tüm kısıtlar doğrusal değildir. Modelin karmaşıklığı bu kısıtların doğrusal olmayan yapısından kaynaklanmaktadır. Modelde verilmeyen ancak ayrıştırma modeli sonuçları ile hesaplanan bir diğer performans ölçütü olan $T_{qk}, k \in W$ istasyon bekleme zamanları Eş. 6.4'te gerekli parametrelerin modelden elde edilip yerine yazılması ile hesaplanabilir.

Eş. 6.4 ve Eş. 6.5'te verilen kapalı form yapılarının ρ 'ya bağlı olarak konveks yapıda olduğunu Buzacott ve Shanthikumar (1993) göstermişlerdir. Ayrıca önerilen modele benzer bir stokastik dengeleme modelinin Bitran ve Tirupati (1989) tarafından konveks olduğu gösterilmiştir. Önerilen modelin Bitran ve Tirupati (1989) modelinden farkı MHDP'ne özgü öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı kısıtlarının kullanılmasıdır. Bu kısıtların yapısı doğrusal olduğu için modelin konveks yapısını bozmayacaktır.

Bu bölümde geliştirilen modelin Bölüm 5.4'te önerilen modelden avantajları şu şekilde özetlenebilir.

- İteratif performans değerlendirme yaklaşımlarındaki ifadelerin KP modeline kısıtlar şeklinde entegre edilmesi mümkün olamamaktadır. Bu sebeple her bir alternatifi ayrı ayrı performans değerlendirme yaklaşımında değerlendirilmesi gerekmektedir. Çok zaman alıcı olan bu yaklaşımın yerine ayrıştırma modellerindeki performans ölçütü ifadelerinin kısıt olarak KP modelinde tanımlanabilmesi mümkündür.
- Kapalı form ifadeler ile daha fazla performans ölçütünün kısıtlar olarak tanımlanması ve bu kısıtları sağlayacak iyi çözümler bulunması mümkündür.

- Uygun çözümlere ulaşmak için daha az hesaplama zamanı ihtiyacı ve modelin etkinliği nedeniyle daha büyük boyutlu problemlerin çözülmesi mümkün olmaktadır.
- Model parametrelerinin performans etkisinin tespit edilmesi ve parametreler arası ödünleşimlerin tespiti daha hızlı yapılabilir. Modelde tüm kısıtları sağlayacak birçok alternatif çözüm üretilir ve amaç fonksiyonu değeri en iyi olan seçilir.
- Birden fazla performans ölçütünü amaç olarak kullanarak yeni çok amaçlı yaklaşımların geliştirilmesine olanak vermektedir.

6.3. Çözüm Metodu

Önerilen model önceki bölümde bahsedildiği üzere doğrusal olmayan kısıtlara ve amaca sahiptir. Bu sebeple model doğrusal programlama ile çözülemez. Çalışmanın bu bölümünde stokastik MHDP için kısıt programlama temelli bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Modelde tüm kısıtları sağlayacak birçok alternatif çözüm üretilir ve amaç fonksiyonu değeri en iyi olan seçilir.

Bölüm 2.3'te detaylı olarak KP'nin avantajlarından bahsedilmekle beraber, bu bölümde önerilen stokastik modelin doğrusal olmayan yapısı ve karmaşıklığı nedeniyle KP'nin özellikle doğrusal olmayan ve probleme özgü kısıtları kolaylıkla tanımlayabilme özelliğinden faydalanılmıştır. Önerilen stokastik modelin doğrusal olmayan yapısından dolayı geleneksel matematiksel modelleme çözüm yöntemlerinin kullanılması olanaksızdır. Ayrıca kuyruk modellemesinden ileri gelen performans ölçütlerinin ifade edilmesi de matematiksel modelleme açısından çok zor olacaktır. Bu nedenle önerilen model doğrusal olmayan ifadelerin de kolaylıkla ifade edildiği kısıt programlamadan faydalanılarak modellenmiş ve çözülmüştür.

Önerilen stokastik modelin etkinliğinin test edilmesi için ise simülasyondan faydalanılmıştır. İlerleyen modellerde kurulan simülasyon modellerinin detayları verilecektir.

KP modeli doğrusal olan geleneksel MHDP'den kaynaklanan kısıtlar ile doğrusal olmayan kuyruk modellemesinden kaynaklanan performans ölçümü ifadelerinden oluşan karışık bir modeldir. Modelde karar değişkeni Eş. 4.12'de verilen $\text{İstasyonNumarası}[Görev_i]$ değişkeninin çözüm kümesinin $\text{İstasyonNumarası}[Görev_i] \in [E_i, L_i] \quad \forall i \in T$ şeklinde güncellenmesi ile kullanılmıştır.

Önerilen KP modeli şu şekildedir.

Amaç fonksiyonu;

$$EnKüçük \quad Eş. 6.7$$

Kısıtlar;

Eş. 4.13, Eş. 4.14 ve

$$\sum_i \mu_i^t \leq \frac{1}{\mu_k^s} \quad \forall i \in T \mid \forall k \in [E_i, L_i] \wedge (İstasyonNumarası[Görev_i] = k) \quad (6.13)$$

Eş. 6.8, Eş. 6.9, Eş. 6.10, Eş. 6.11 ve Eş. 6.12.

Modelde Eş. 4.13 ve Eş. 4.14 geleneksel MHDP'nin atama ve öncelik ilişkileri kısıtlarını ifade etmektedir. Bu kısıtlardan Eş. 4.14 Bölüm 4.3'te bahsedilen *pack* global kısıtı kullanılarak sağlanmıştır. Eş. 6.13 ise bir istasyona atanan görevlerin ortalama görev süreleri kullanılarak o istasyonun ortalama iş yükünün tespiti için kullanılır. Eş. 6.8 ile Eş. 6.12 arasındaki ifadeler önerilen KP modelinde de aynen kullanılmıştır. Ancak performans değerlerini ifade eden bu kısıtlar doğrusal olmayan yapılarından dolayı IBM ILOG CP Optimizer paket programında doğrusal programlama modelinden farklı olarak ifade edilirler. İleriki bölümlerde bu ifadenin nasıl olduğundan bahsedilmiştir.

KP'de sadece kesikli karar değişkenlerinin ifade edilmesi mümkün olmaktadır. Bu sebeple doğrusal olmayan kısıtlardan dolayı oluşacak sürekli karar değişkenlerinin ifadesi IBM ILOG paket programında "*dexpr*" ifadesi ile kolaylıkla sağlanmaktadır. *dexpr* ifadesi genellikle amaç fonksiyonu tanımlamak için kullanılsa da sonucu reel sayı olan ifadeler için de kullanılır. Ayrıca *dexpr* ifadesi çeşitli dönüşümler yapılarak modeldeki değişken sayısını azaltmak için de kullanılır.

Kullanım oranı ifadesi verilen bir λ değeri için Eş. 6.8'te verildiği şekilde sürekli bir karar değişkeni *dexpr* olarak aynen ifade edilir. Eş. 6.9 ise sistemin kararlı durum yapısının bozulmaması için gerekli olan yoğun trafik kısıtıdır ve KP modelinde de aynen ifade edilir.

Eş. 6.10, Eş. 6.1, Eş. 6.2 ve Eş. 6.3'te, Eş. 6.11 ise Eş. 6.5'te verilen ifadelerin paket programda doğrusal olmayan ifadeler şeklinde modele tanıtılması ile sağlanmıştır. Eş. 6.10 ilgili olduğu eşitlikler kullanılarak aynı doğrusal ifadeler gibi modele kısıt olarak eklenmiştir. Ancak Eş. 6.11 çözüm kümesi reel sayılar olan bir karar değişkeni niteliğindedir. Bu yüzden IBM ILOG CP Optimizer paket programında modelin amaç fonksiyonu olan *WIP* bir *dexpr* ifadesi olarak aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

*dexpr float WIP[s in stations] = ((SCV_a[s]+SCV_e[s])/2) * ((rho[s]^2)/(1-rho[s])) + rho[s];*

Bu ifade de *stations* hatta bulunan istasyon sayısını göstermek üzere, *SCV_a[s]* talepler arası zaman değişkenlik katsayısı karesini, *SCV_e[s]* istasyon zamanı değişkenlik katsayısı karesini ve *rho[s]* istasyon kullanım oranlarını ifade eden değişkenlerdir. İstasyon bekleme zamanları da aynı şekilde Eş. 6.4'te verilen kapalı form ile tanımlanmıştır. Bu tanımlamalardan sonra performans ölçütlerinin bir karar değişkeni gibi kullanılması mümkündür. Keza uygun parametre değerleri sağlandığında istasyon bekleme oranları için belirlen Eş.6.6'daki alt ve üst sınırlar KP modeline birer kısıt olarak tanımlanabilmiştir.

SCV_a[s] ifadesi her bir istasyon için bir *dexpr* olarak tanımlanmış cv_{Ak}^2 değeridir ve Eş. 6.2 ve Eş. 6.3 ifadelerini içermektedir. *SCV_e[s]*, cv_{Ek}^2 değeridir, Önerme 5.3.1'den yola çıkarak belirlenmiş bir görev atama kombinasyonu kullanılarak, görev sürelerinin ortalama ve varyansları ile istasyon iş yüklerinin ortalama ve varyansları tespit edilip, Eş. 5.2 kullanılarak istasyon iş yüklerinin değişkenlik katsayıları karelerinin belirlendiği *dexpr* ifadesidir. *SCV_d[s]* ise istasyonlar arasındaki çıkışlar arası değişkenlik katsayısı karelerinin cv_{Di}^2 dönüşümünü ifade etmektedir. cv_{Di}^2 değeri de bir *dexpr* ifadesi olarak KP modelinde tanımlanmıştır. *SCV_d[s]*, *SCV_a[s]* ve *SCV_e[s]* arasındaki dönüşüm ifadesi Eş. 6.2 KP modeline bir kısıt olarak tanımlanarak istasyonlar arası değişkenlik katsayısı dönüşümü sağlanmıştır.

Yukarıda anlatılan tanımlamalar ile kuyruk performans modeline ait kapalı form ifadelerin entegre edildiği yeni MHDP'ye ait KP modeli elde edilmiştir. Modelin doğruluğu manuel hesaplamalar ile gösterilmiştir. Ayrıca model ileriki bölümlerde literatürdeki test

problemleri ile değerlendirilecektir. Elde edilen sonuçlar ayrıştırma modelinden elde edilecek iyi çözümün simülasyon sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

Simülasyonun stokastik üretim hatlarının modellenmesinde etkili bir çözüm yöntemi olduğu daha önce söylenmişti. Bu çalışmada simülasyon kullanılmasının amacı önerilen yaklaşımın stokastik hatların performans değerlendirmesinde isabetli ve etkili sonuçlar gösterip göstermediğinin tespit edilmesidir. Ancak çok fazla alternatif konfigürasyonun değerlendirilmesi gerektiği durumlarda simülasyon kullanılması çok mümkün olamamaktadır (Manitz, 2008). Bu nedenle, çalışma zamanı sonucunda ayrıştırma modelinden elde edilen son görev atama kombinasyonun simülasyon modeli oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Genel dağılımlı görev süreleri ayrıştırma modelinden elde edilen ortalama ve değişkenlik katsayı kareleri değerleri kullanılarak Gamma dağılımı olarak modellenmiştir. Gamma dağılımı genel dağılımlı süreleri ifade edebilmek için kullanılan en uygun dağılımdır (Smith, Cruz, ve Van Woensel, 2010). Montaj hatlarının seri yapısı nedeniyle simülasyon modeli birbirine sıralı bağlanmış istasyonlardan oluşmaktadır. Simülasyon modelleri Simio 7.119 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deney 10 kez 110 000 saat çalışma zamanı ve 10 000 saat ısınma süresi ile çalıştırılmıştır. Deney sonuçları ilerleyen bölümde raporlanmıştır.

6.4. Deneysel Analizler

Bu bölümde test problemleri için önerilen model ve simülasyon modelinden elde edilen sonuçlar rapor edilmiştir. Daha sonra önerilen modelin hesaplama zamanı açısından etkinliğini görmek ve bir zaman sınırı belirlemek için hesaplama zamanı analizi yapılmıştır. KP'nin uygun çözümlere hızlı ulaşabilmesi nedeniyle yapılan analizlerde hesaplama zamanının 7 200 saniye olarak belirlenmesinin iyi çözümlerin elde edilmesinde yeterli olacağı görülmüştür. Önerilen model IBM ILOG CP Optimizer paket programında modellenip çözülmüştür.

6.4.1. Sayısal sonuçlar

Bu bölümde önerilen stokastik model Scholl (1993) çalışmasından alınan veri setleri ile test edilmiştir. Test problemleri 30 ile 94 iş arasında görev sayısına ve 4 ile 10 istasyon sayısına sahiptir. Test problemlerindeki orijinal öncelik ilişkileri ve görev süreleri korunmuştur. Görev süreleri genel dağılımlı görev sürelerinin ortalaması olarak kabul

edilmiştir. Görev sürelerinin standart sapmalarının hesaplanmasında değişkenlik katsayısı kullanılmıştır. Görev sürelerinin değişkenlik katsayısı için dört farklı değer kullanılmıştır: 0,2; 0,5; 0,8; 1. İstasyonlarda trafik denkleminin sağlanması için talepler arası zaman ilgili veri setinin teorik çevrim zamanının % 90'ını geçmeyecek şekilde seçilmiştir. Talepler arası zamanın değişkenlik katsayısı için de 0,2 ve 0,8 olarak iki farklı değer ele alınmıştır. Önerilen model IBM ILOG CP Optimizer paket programında kodlanmış ve testler yapılmıştır. Analizlerde kullanılan performans ölçütleri ortalama istasyon kullanım oranı, hat çıktı hızı ve hatta bulunan ortalama ürün sayısı (WIP) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 ile Çizelge 6.10 arasında test problemleri için sayısal sonuçlar rapor edilmiştir. Önerilen modelin ürettiği iyi çözümden elde edilen veriler ile hattın simülasyonu oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları önerilen modelin başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermiştir. Çizelge 6.1 ile Çizelge 6.10 incelendiğinde önerilen modelden elde edilen hat tasarımının kullanım oranı simülasyon sonuçları ile neredeyse aynı elde edilmiştir. Kullanım oranı Eş. 6.8'ten dolayı ya talepler arası zamana ya da istasyon iş yüküne bağlı olarak değişir. Bu yüzden seri yapıya sahip sistemlerde farklı değişkenlik katsayıları değeri için kullanım oranı değişmez. Benzer durum çıktı hızı için de geçerlidir. Akışın korunumu kuralına göre seri sistemlerde verilen bir $1/\lambda$ değeri için çıktı hızı geliş oranına eşit olacaktır.

WIP açısından sonuçlar değerlendirildiğinde modelden elde edilen en iyi sonucun simülasyon ile göreceli farkı ortalama % -2,907 olarak tespit edilmiştir. Maksimum göreceli fark Mukherje 6 istasyon $1/\lambda = 772$ problemi için % -21,305 olarak, minimum göreceli fark Kilbridge 4 istasyon $1/\lambda = 184$ problemi için % -0,012 olarak tespit edilmiştir. Büyük göreceli farklar genellikle $cv = 0,2$ değişkenlik değerine sahip problemlerde ortaya çıkmıştır. Bu durumun nedeni küçük cv değerleri için görev atamaları elde edildikten sonra istasyonların değişkenlik katsayısı kareleri çok küçük değerler olarak hesaplanır. Çok küçük değişkenlik katsayısı değerleri istasyon iş yüklerinin neredeyse deterministik olmasına neden olacaktır. Simülasyon gamma dağılımlı istasyon iş yükleri ile modellendiği için bu durum simülasyon ile sonuçlar arasında göreceli farkın büyük olmasına neden olmaktadır. Genel olarak elde edilen bu sonuçlar önerilen modelin performansının yeterli olduğunu göstermiştir.

Önerilen modelin sistem performansı üzerinde anlamlı sonuçlar verip vermediği hattaki değişkenliğin değişmesi ile modelin vereceği tepki değerlendirilerek test edilmiştir. Bu test Kilbridge 10 istasyon test problemi $1/\lambda = 69$ ve görev süreleri deterministik kabul edildiğinde yani $cv = 0$ ve $cv_A^2 = 0$ olduğu durumda elde edilen iyi çözümün (yani istasyonlara atanan görev kümelerinin) değişkenliğin $cv = 0,2$ ve $cv_A^2 = 0,2$ olduğu durumda aynen yerine yazılması ile değerlendirilmiştir. Deterministik durumdan elde edilen görev atama kombinasyonlarının $cv = 0,2$ ve $cv_A^2 = 0,2$ olduğu durumda modele kısıt olarak eklenmesi ile WIP 13,874, bekleme zamanı ise 405,305 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç eğer model yeniden dengelenmez (görev atama kombinasyonları değiştirilmezse) ve değişkenlikler sadece 0,2 birim artırılsa, performansın olumsuz yönde etkileneceğini göstermiştir. Değişkenliklerin 0,2 olduğu durumda önerilen model çalıştırıldığında elde edilen en iyi çözümün performansı ise WIP 8,836 ve bekleme zamanı 57,673 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda önerilen modelin MHD'de daha iyi performansa sahip bir atama bulduğu söylenebilir.

Çizelge 6.1. Sawyer 30 görev 7 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	52	0,2	0,8901	0,8905	1,1538	1,1154	7,4858	8,2100	-8,821
		0,5		0,8897		1,1153	10,5953	10,5300	0,620
		0,8		0,8908		1,1547	16,0811	15,3100	5,037
		1		0,8895		1,1532	21,1291	19,6200	7,692
	59	0,2	0,7845	0,7849	1,0169	1,0174	6,0965	6,1100	-0,221
		0,5		0,7848		1,0170	7,2766	7,0200	3,655
		0,8		0,7846		1,0170	9,3611	8,8000	6,376
		1		0,7846		1,0171	11,2584	10,4400	7,839
0,8	59	0,2	0,7845	0,7839	1,0169	1,0163	7,1787	8,2100	-12,562
		0,5		0,7846		1,0171	8,4597	9,1500	-7,544
		0,8		0,7838		1,0161	10,6685	11,1200	-4,060
		1		0,7841		1,0165	12,6588	12,8700	-1,641
	62	0,2	0,7465	0,7481	0,9677	0,9687	6,7008	7,3141	-8,385
		0,5		0,7459		0,9670	7,6625	7,9275	-3,343
		0,8		0,7474		0,9688	9,3228	9,5822	-2,707
		1		0,7481		0,9696	10,8187	10,9817	-1,484

Çizelge 6.2. Sawyer 30 görev 10 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	37	0,2	0,8757	0,8752	1,6216	1,6207	10,4038	10,9600	-5,075
		0,5		0,8759		1,6219	16,0276	15,7400	1,827
		0,8		0,8755		1,6212	26,1304	24,5500	6,437
		1		0,8755		1,6212	35,1108	32,8400	6,915
	42	0,2	0,7714	0,7712	1,4286	1,4282	8,4981	8,4600	0,450
		0,5		0,7715		1,4288	10,7196	10,3000	4,074
		0,8		0,7711		1,4281	14,7437	13,7600	7,149
		1		0,7719		1,4293	18,4556	17,1600	7,550
0,8	42	0,2	0,7714	0,7706	1,4286	1,4271	9,4905	10,8400	-12,450
		0,5		0,7719		1,4293	11,8605	12,5400	-5,419
		0,8		0,7703		1,4265	16,0109	16,3000	-1,774
		1		0,7723		1,4300	19,7668	20,0800	-1,560
	45	0,2	0,7200	0,7202	1,3333	1,3336	8,6678	9,2262	-6,052
		0,5		0,7205		1,3342	10,3215	10,6280	-2,884
		0,8		0,7197		1,3328	13,2092	13,2673	-0,438
		1		0,7201		1,3336	15,8405	15,8494	-0,056

Çizelge 6.3. Kilbridge 45 görev 4 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	152	0,2	0,9079	0,9077	0,3947	0,3946	4,6187	5,6300	-17,963
		0,5		0,9077		0,3946	5,6689	6,1178	-7,338
		0,8		0,9067		0,3942	7,4506	7,3485	1,389
		1		0,9066		0,3941	8,9891	8,6174	4,313
	173	0,2	0,7977	0,7975	0,3468	0,3467	3,6776	3,7126	-0,942
		0,5		0,7970		0,3465	4,0105	3,8948	2,971
		0,8		0,7978		0,3467	4,5807	4,3738	4,731
		1		0,7977		0,3467	5,0847	4,7886	6,184
0,8	173	0,2	0,7977	0,7970	0,3468	0,3465	4,9507	5,5759	-11,213
		0,5		0,7968		0,3464	5,3005	5,7472	-7,773
		0,8		0,7978		0,3467	5,9264	6,3126	-6,118
		1		0,7980		0,3468	6,4885	6,7348	-3,657
	184	0,2	0,7500	0,7480	0,3261	0,3252	4,4551	4,5573	-2,242
		0,5		0,7496		0,3259	4,6920	4,6926	-0,012
		0,8		0,7492		0,3256	5,1182	5,0519	1,312
		1		0,7499		0,3559	5,4961	5,5138	-0,321

Çizelge 6.4. Kilbridge 45 görev 10 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	61	0,2	0,9049	0,9063	0,9836	0,9851	10,9854	11,9800	-8,302
		0,5		0,9047		0,9835	17,2925	17,3100	-0,101
		0,8		0,9049		0,9837	28,4209	27,6800	2,677
		1		0,9056		0,9844	38,6967	36,9500	4,727
	69	0,2	0,8000	0,8006	0,8696	0,8702	8,8358	8,9500	-1,276
		0,5		0,7995		0,8691	11,1337	10,7800	3,281
		0,8		0,7997		0,8694	15,2144	14,3100	6,320
		1		0,7996		0,8691	19,0206	17,6400	7,827
	74	0,2	0,7459	0,7475	0,8108	0,8125	8,9812	10,1800	-11,776
		0,5		0,7467		0,8117	10,6962	11,2764	-5,145
		0,8		0,7458		0,8107	13,5250	13,8481	-2,333
		1		0,7472		0,8117	16,1230	16,3957	-1,663

Çizelge 6.5. Warnecke 58 görev 6 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	284	0,2	0,9085	0,9084	0,2113	0,2112	6,4403	7,2600	-11,290
		0,5		0,9071		0,2109	7,9667	8,3300	-4,362
		0,8		0,9070		0,2109	10,5520	10,5300	0,209
		1		0,9086		0,2112	12,8974	12,7100	1,474
	323	0,2	0,7988	0,7981	0,1858	0,1856	5,2774	5,5300	-4,568
		0,5		0,7983		0,1856	5,7870	5,7200	1,172
		0,8		0,7997		0,1859	6,6625	6,4600	3,134
		1		0,7979		0,1855	7,4583	7,0500	5,791
	323	0,2	0,7988	0,7974	0,1858	0,1854	6,4282	7,3800	-12,898
		0,5		0,7967		0,1853	7,0035	7,8400	-10,670
		0,8		0,8012		0,1862	7,9556	8,7400	-8,975
		1		0,7962		0,1850	8,7885	9,2300	-4,783
0,8	344	0,2	0,7500	0,7469	0,1744	0,1737	5,8956	6,4403	-8,458
		0,5		0,7481		0,1739	6,2781	6,6482	-5,568
		0,8		0,7478		0,1739	6,9346	7,0749	-1,983
		1		0,7482		0,1739	7,5138	7,5989	-1,120

Çizelge 6.6. Warnecke 58 görev 10 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	171	0,2	0,9053	0,9065	0,3509	0,3513	10,4712	11,6200	-9,886
		0,5		0,9047		0,3507	14,4519	14,6800	-1,554
		0,8		0,9042		0,3505	21,5182	20,6200	4,356
		1		0,9039		0,3503	27,9874	26,3000	6,416
	194	0,2	0,7979	0,7978	0,3093	0,3092	8,6158	8,7700	-1,758
		0,5		0,7990		0,3096	10,0429	9,9100	1,341
		0,8		0,7975		0,3091	12,5717	11,9300	5,379
		1		0,7984		0,3094	14,8921	13,9700	6,601
0,8	194	0,2	0,7979	0,7978	0,3093	0,3092	9,6317	10,5400	-8,618
		0,5		0,7980		0,3093	11,2157	12,3100	-8,890
		0,8		0,7983		0,3094	13,8771	14,7200	-5,726
		1		0,7988		0,3096	16,2458	17,1200	-5,106
	206	0,2	0,7515	0,7519	0,2913	0,2915	8,9115	10,0300	-11,152
		0,5		0,7509		0,2910	10,0383	10,7900	-6,967
		0,8		0,7500		0,2907	11,9340	12,3800	-3,603
		1		0,7511		0,2911	13,6330	13,9100	-1,991

Çizelge 6.7. Wee-Mag 75 görev 5 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	330	0,2	0,9085	0,9074	0,1818	0,1816	5,3876	6,1000	-11,679
		0,5		0,9081		0,1817	6,1500	6,7000	-8,208
		0,8		0,9071		0,1815	7,3918	7,5700	-2,354
		1		0,9011		0,1812	8,4893	8,2500	2,900
	375	0,2	0,7995	0,7989	0,1600	0,1600	4,4437	4,5700	-2,765
		0,5		0,7994		0,1599	4,6864	4,6600	0,567
		0,8		0,7984		0,1597	5,0994	4,9700	2,604
		1		0,7985		0,1597	5,4694	5,2600	3,981
0,8	375	0,2	0,7995	0,8003	0,1600	0,1602	5,6587	6,3200	-10,464
		0,5		0,7954		0,1591	5,9249	6,7760	-12,560
		0,8		0,7962		0,1593	6,3815	6,8900	-7,381
		1		0,7987		0,1597	6,7781	7,3700	-8,031
	400	0,2	0,7495	0,7485	0,1500	0,1498	5,1508	5,4100	-4,790
		0,5		0,7442		0,1489	5,3213	5,5100	-3,425
		0,8		0,7502		0,1500	5,6216	5,8600	-4,068
		1		0,7486		0,1497	5,8932	6,0300	-2,269

Çizelge 6.8. Wee-Mag 75 görev 10 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	165	0,2	0,9085	0,9084	0,3636	0,3636	10,2642	11,2700	-8,925
		0,5		0,9087		0,3637	13,1405	13,7500	-4,433
		0,8		0,9090		0,3638	18,1687	18,0800	0,491
		1		0,9074		0,3632	22,6877	21,7100	4,503
	188	0,2	0,7973	0,7973	0,3192	0,3192	8,5056	8,8300	-3,674
		0,5		0,7960		0,3186	9,4828	9,3700	1,203
		0,8		0,7977		0,3193	11,2392	10,8600	3,492
		1		0,7971		0,3190	12,8134	12,2100	4,942
	200	0,2	0,7973	0,7986	0,3192	0,3197	9,4878	11,6400	-18,490
		0,5		0,7960		0,3186	10,6093	12,0100	-11,663
		0,8		0,7959		0,3186	12,5098	13,2300	-5,444
		1		0,7966		0,3188	14,1081	14,9400	-5,568
0,8	188	0,2	0,7973	0,7986	0,3192	0,3197	9,4878	11,6400	-18,490
		0,5		0,7960		0,3186	10,6093	12,0100	-11,663
		0,8		0,7959		0,3186	12,5098	13,2300	-5,444
		1		0,7966		0,3188	14,1081	14,9400	-5,568
	200	0,2	0,7495	0,7478	0,3000	0,2993	8,8002	9,4800	-7,171
		0,5		0,7495		0,2998	9,5835	10,4300	-8,116
		0,8		0,7498		0,3001	10,8803	11,5000	-5,389
		1		0,7498		0,3001	12,0390	12,5900	-4,376

Çizelge 6.9. Mukherje 94 görev 6 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	772	0,2	0,9085	0,9089	0,0777	0,0777	6,3770	8,1034	-21,305
		0,5		0,9083		0,0777	7,5298	8,1200	-7,268
		0,8		0,9106		0,0778	9,4939	9,8300	-3,419
		1		0,9080		0,7762	11,2617	11,2500	0,104
	877	0,2	0,7997	0,8013	0,0684	0,0685	5,2741	5,4900	-3,932
		0,5		0,7995		0,0684	5,6528	5,5900	1,124
		0,8		0,7994		0,0684	6,3142	6,1300	3,005
		1		0,8018		0,0685	6,9312	6,7000	3,451
	877	0,2	0,7997	0,7978	0,0684	0,0682	6,5013	7,3310	-11,319
		0,5		0,7961		0,0681	6,9025	7,6500	-9,771
		0,8		0,7999		0,0684	7,6127	8,2500	-7,725
		1		0,7980		0,0682	8,2477	8,8200	-6,488
0,8	935	0,2	0,7501	0,7458	0,0642	0,0638	5,9425	6,2563	-5,016
		0,5		0,7468		0,0639	6,2098	6,3656	-2,448
		0,8		0,7520		0,0643	6,6898	7,0317	-4,862
		1		0,7514		0,0642	7,1265	7,2677	-1,942

Çizelge 6.10. Mukherje 94 görev 9 istasyon test problemi sonuçları

cv_A^2	$1/\lambda$	cv	$\bar{\rho}_{model}$	$\bar{\rho}_{sim}$	θ_{model}	θ_{sim}	WIP_{model}	WIP_{sim}	%fark
0,2	515	0,2	0,9079	0,9066	0,1165	0,1163	9,3264	10,6600	-12,511
		0,5		0,9079		0,1164	11,9375	12,5800	-5,108
		0,8		0,9069		0,1163	16,5187	16,2100	1,904
		1		0,9074		0,1164	20,5881	19,7900	4,033
	585	0,2	0,7992	0,7998	0,1026	0,1026	7,7275	8,0300	-3,768
		0,5		0,8007		0,1027	8,6128	8,5800	0,382
		0,8		0,8008		0,1027	10,1742	9,8600	3,187
		1		0,7982		0,1023	11,6189	10,9900	5,722
	623	0,2	0,7992	0,7981	0,1026	0,1024	8,7993	10,4000	-15,392
		0,5		0,7955		0,1021	9,7914	10,8500	-9,757
		0,8		0,7983		0,1023	11,4439	12,0800	-5,266
		1		0,8004		0,1026	12,9177	13,7500	-6,053
0,8	585	0,2	0,7992	0,7981	0,1026	0,1024	8,7993	10,4000	-15,392
		0,5		0,7955		0,1021	9,7914	10,8500	-9,757
		0,8		0,7983		0,1023	11,4439	12,0800	-5,266
		1		0,8004		0,1026	12,9177	13,7500	-6,053
	623	0,2	0,7505	0,7520	0,0963	0,0965	8,1249	9,1500	-11,203
		0,5		0,7489		0,0960	8,8061	9,3800	-6,118
		0,8		0,7476		0,0959	9,9662	10,3100	-3,335
		1		0,7480		0,0959	10,9867	11,2916	-2,700

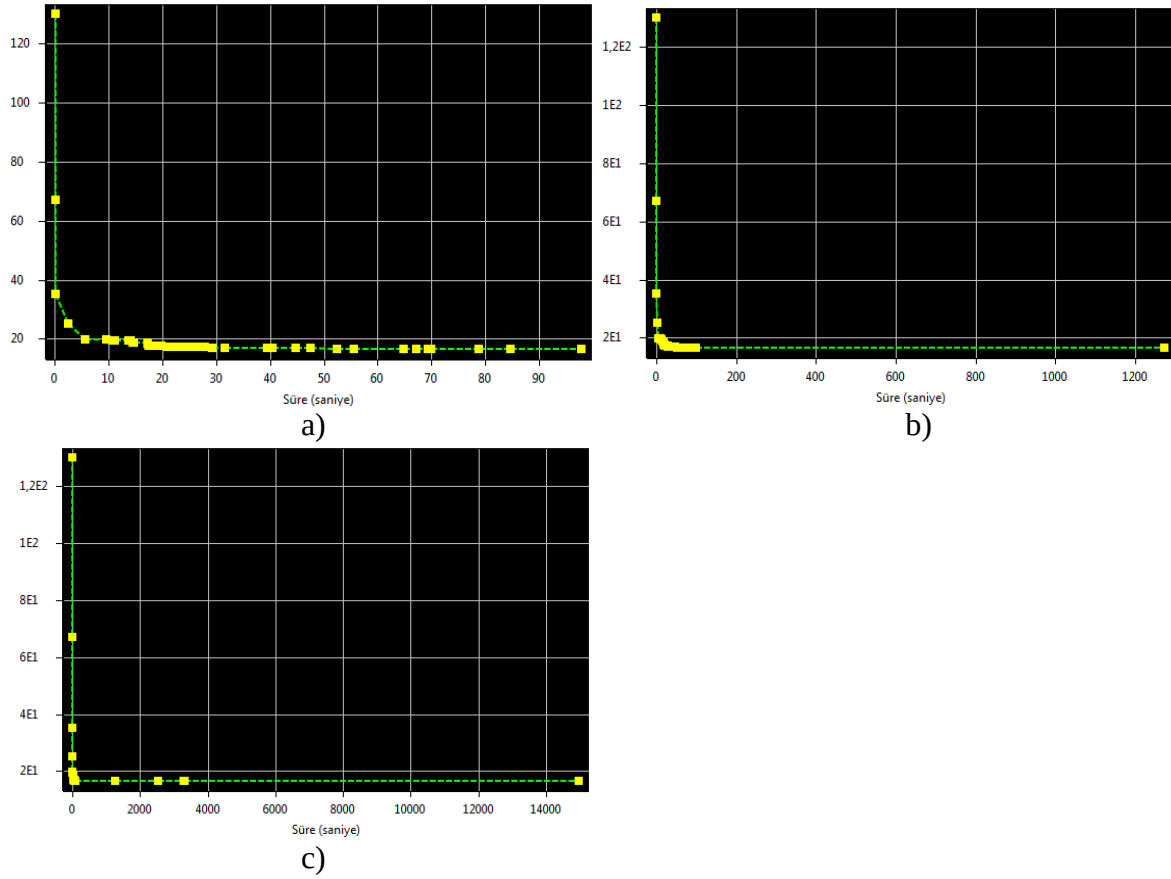
6.4.2. Hesaplama zamanı analizi

Bu bölümde önerilen modelin etkili sonuçlar üretebilmesi için ne kadar hesaplama zamanı çalıştırılması gerektiği araştırılacaktır. Eğer uygun bir çalışma zamanı belirlenebilirse çok uzun hesaplama zamanı geçmeden kabul edilebilir iyi çözümlere ulaşılabilecektir. Bu amaçla önerilen model en büyük veri seti olan Mukherje 94 iş 9 istasyon test problemi $1/\lambda = 515$, $cv = 0,8$ ve $cv_A^2 = 0,2$ için IBM ILOG CP Optimizer paket programında 15 000 saniye gibi uzun bir hesaplama zamanı ile çalıştırılmıştır. Şekil 6.2’de farklı hesaplama zamanı anlarında modelin ürettiği çözüm sayıları ve amaç fonksiyonu değerleri verilmiştir.

Önerilen model Şekil 6.2a’da 100 saniye çalıştırıldığında 46 farklı uygun çözüm üretilmiş ve ulaşılan amaç fonksiyonu değeri 16,5324 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.2b ve Şekil 6.2c için ise çalışma zamanı, uygun çözüm sayısı ve amaç fonksiyonu değerleri sıra ile şu şekilde gerçekleşmiştir: 1 300 saniye, 47 uygun çözüm, amaç fonksiyonu 16,5308; 15 000 saniye, 51 uygun çözüm, amaç fonksiyonu 16,5187.

Hesaplama zamanı artırıldıkça amaç fonksiyonu değerinde çok düşük ve dikkate alınmayacak değişiklikler gerçekleşmiştir. Yaklaşık 3 700 saniye çalışma zamanından

sonra amaç fonksiyonunda dikkate değer bir iyileşme olmamıştır. Yapılan hesaplama zamanı testlerine göre çalışma zamanı 7 200 saniye (2 saat) olarak ayarlandığında yeterli sayıda uygun çözüme ve kabul edilebilir bir amaç fonksiyonu değerine ulaşılabileceği görülmüştür. Bu sebeple önerilen ayrıştırma modeli 7 200 saniye hesaplama zamanı ile test problemleri üzerinde değerlendirilmiştir.



Şekil 6.2. Hesaplama zamanı analizi sonuçları a) 100 saniye b) 1 300 saniye c) 15 000 saniye

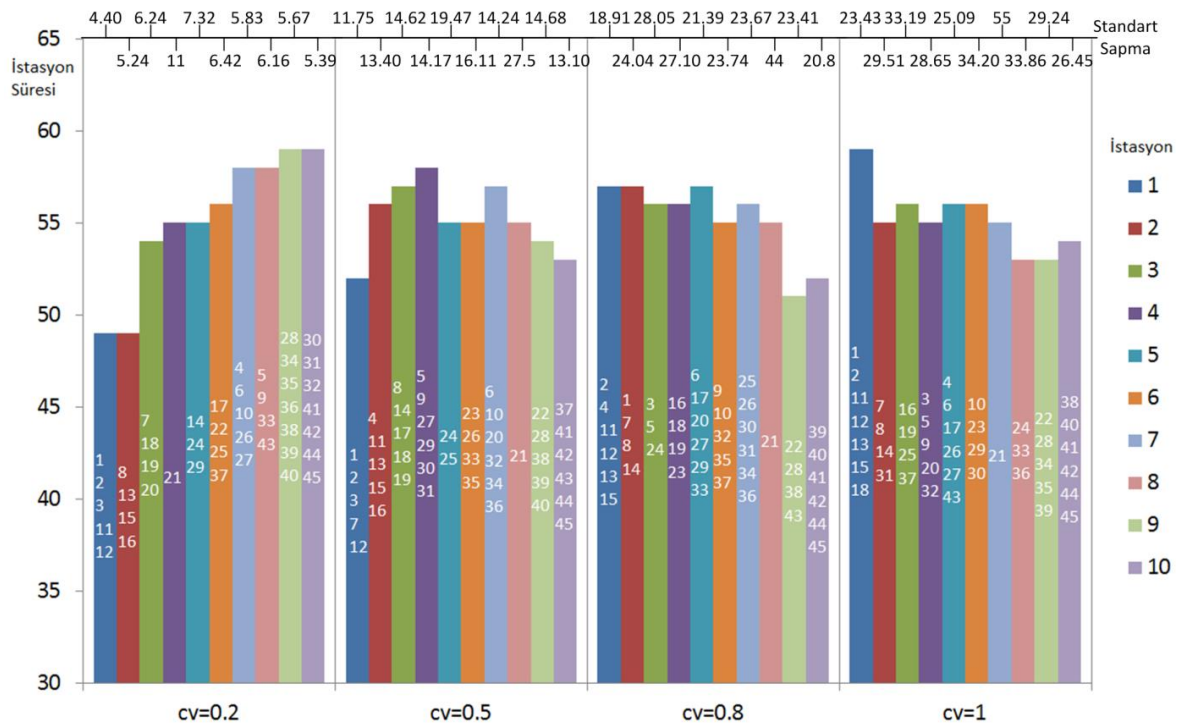
6.5. Tartışma ve Çıkarımlar

Bu bölümde sayısal deneyler neticesinde elde edilen bilgiler ışığında performans ölçütleri hakkında çeşitli çıkarımlarda bulunulacaktır. Her bir alt bölümde performans parametreleri ve MHD üzerine tartışmalar yapılacaktır.

6.5.1. İstasyon iş yükü analizi

Bu bölümde istasyon iş yüklerinin nasıl dengelendiği araştırılacaktır. MHDP’de istasyon iş yüklerinin belirlenmesi istasyona atanan görev grupları ile ilgilidir. Stokastik görev zamanlı hatlarda ise görev zamanları ortalama ve standart sapmaya sahip bir dağılım göstermektedir. Önerilen stokastik model görev sürelerinin ortalamaları ve değişkenlik katsayılarını göz önünde bulundurarak istasyonlara görev atamalarını performans ölçütünü en iyileyecek şekilde gerçekleştirmektedir. Bu amaçla ele alınan veri setlerinden Kilbridge 45 iş 10 istasyona ve Wee-Mag 75 iş 5 istasyona sahip test problemleri incelenmiştir.

Şekil 6.3 ve Şekil 6.6 arasındaki grafikler test problemleri için istasyon iş yüklerinin nasıl dağıldığını göstermektedir. Grafiklerde alttaki x eksen farklı görev süresi değişkenlikleri için istasyon iş yükü dağılımlarını, üstte yer alan x eksen bu sürelerle ait standart sapmaları göstermektedir. Grafiklerde her bir çubuk bir istasyonu, bu çubuklar içerisinde yazılı sayı grupları ise o istasyona atanan görevleri göstermektedir. Kıyaslamanın anlamlı olması ve değişkenliğin görev ataması ve istasyon iş yükleri üzerindeki etkisini görebilmek için test problemleri aynı $1/\lambda$ değeri, farklı cv_A^2 değerleri için test edilmiştir.



Şekil 6.3. Kilbridge 10 istasyon test problemi için istasyon iş yükleri ($1/\lambda = 69, cv_A^2 = 0,2$)

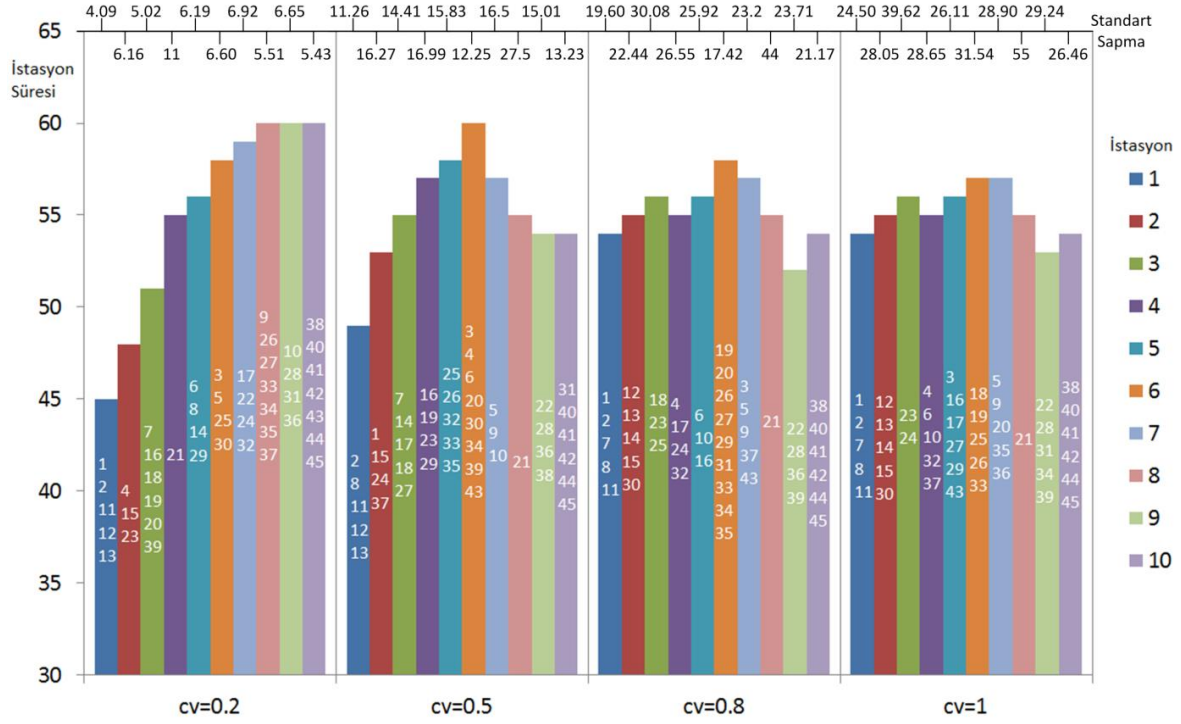
Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, değişkenlik katsayılarının değiştirilmesi ile hem görev atama kombinasyonlarının hem de buna bağlı olarak istasyon iş yüklerinin değiştiği kolaylıkla görülmektedir. Esas dikkat edilmesi gereken grafiklerde istasyon iş yüklerinin gösterdiği iniş ve çıkışların ne anlam ifade ettiğidir. Burada kritik soru değişkenlik arttıkça nasıl bir atama yapılmalı ki minimum WIP değeri elde edilsin, olmalıdır. Bu tür ilginç çıkarımlar için aşağıda birkaç sonuçtan bahsedilecektir.

6.5.1. Çıkarım

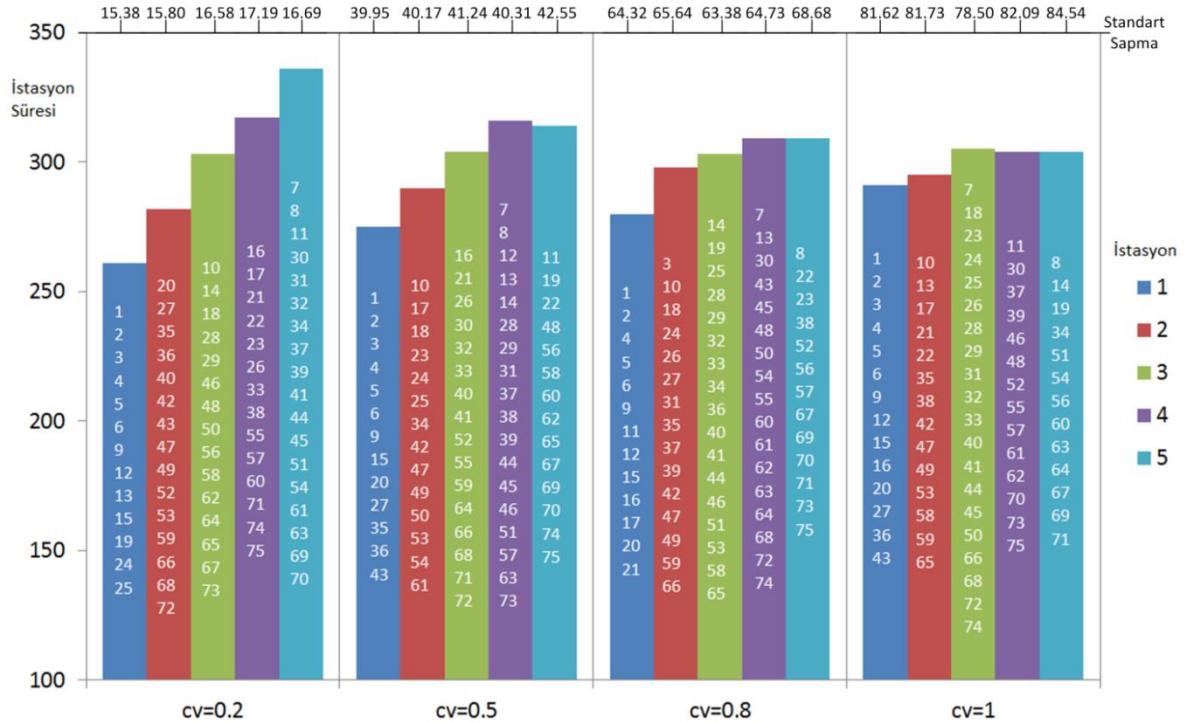
Görevler $\|W\|$ adet istasyona $cv_{Ak}^2 \geq cv_{Ek}^2, k=1, \dots, \|W\|$ olmak üzere, istasyon kullanım oranları $\rho_1 \leq \rho_2 \leq \dots \leq \rho_{\|W\|}$ olacak şekilde atanır.

İspat

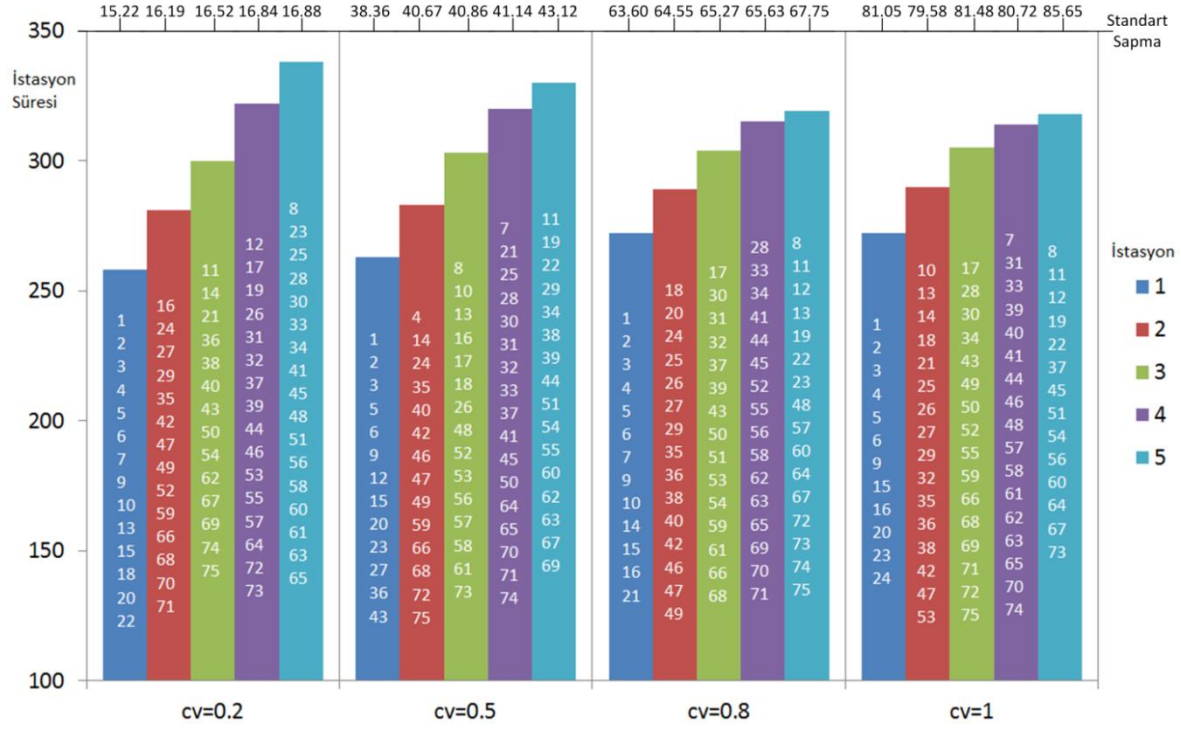
Önerilen modelin amaç fonksiyonunun minimum WIP olduğu göz önünde bulundurulduğunda, Eş. 6.5 ile hesaplanan WIP'in Kingman formülünde yer alan v ve u terimlerine bağlı bir ölçüt olduğu görülür. Modelde bir görev atama kombinasyonuna ait $cv_{Ek}^2, k=1, \dots, \|W\|$ değerleri Önerme 5.3.1'de belirtildiği şekilde hesaplanır. $\rho_k = \lambda / \mu_k^s$ ifadesi kullanılarak kullanım oranları belirlenir. Eş. 6.2 ve Eş. 6.5'in ρ ifadesine bağlı olduğu görülür. Minimum WIP oranı için v ve u terimlerinin de minimum atanması gerekir. Önceden tanımlı cv_A^2 değeri ilk istasyon için gelişler arası oran kabul edildiğinde ($cv_A^2 = cv_{A1}^2$), görev atamalarından elde edilecek cv_{Ek}^2 ve ρ_k ifadelerinin de minimum olması gerekir. Keza Eş. 6.2'de eşitliğin sağ tarafındaki cv_{Ak}^2 değeri artırıldığında, Eş. 6.5'teki minimum WIP'i sağlamak için ρ 'nun azalması gerekmektedir (ρ 'nun sıfıra ve bire doğru yaklaşması durumundan Bölüm 6.1'de bahsedilmişti). Bu durum Eş. 6.2'nin değişkenliği istasyonlar arası dönüştürmesinden dolayı silsile halinde her bir istasyon arasında geçerli olacaktır. Test problemlerinde toplam görev süresinin öncelik ilişkileri sağlanacak şekilde atanması durumunda minimum WIP ancak $\rho_1 \leq \rho_2 \leq \dots \leq \rho_{\|W\|}$ şartı sağlandığında elde edilecektir. Bu durum Wee-Mag test problemi için yapılan testlerde Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'te görülmektedir.



Şekil 6.4. Kılbridge 10 istasyon test problemi için istasyon iş yükleri ($1/\lambda = 69, cv_A^2 = 0,8$)



Şekil 6.5. Wee-Mag 5 istasyon test problemi için istasyon iş yükleri ($1/\lambda = 375, cv_A^2 = 0,2$)



Şekil 6.6. Wee-Mag 5 istasyon test problemi için istasyon iş yükleri ($1/\lambda = 375, cv_A^2 = 0.8$)

6.5.2. Çıkarım

Eğer istasyonların değişkenlik katsayıları arasında belirli bir ilişki yoksa (Çıkarım 6.5.1’de olduğu gibi), görev ataması değişkenlik dengesizliği gösterir.

İspat

P. N. Rao (1976) çalışmasında bir seri üretim sisteminde yüksek değişkenliğe sahip bir istasyonun düşük değişkenliğe sahip bir istasyonu takip etmesi gerektiğini göstermiştir. Buradan yola çıkarak istasyonlara görevlerin birbirinin değişkenlik katsayılarını değerlendirecek şekilde atanması iyi sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Ancak MHDP’nin doğasında var olan öncelik ilişkileri ve görevlerin bölünemez oluşu silsile şeklinde görevlerin değişkenliklerinin azaltılmasına müsaade etmemektedir. Bu yüzden istasyonlar arası değişkenliğin dönüştürüldüğü Eş. 6.2 ve görevlerin atanmasında öncelik ilişkilerini göz önünde bulundurduğumuzda, özellikle değişkenliğin artması ile hatta değişkenlik dengesizliğinin görülmesi doğal bir sonuç olarak ortaya çıkar. Bu durum Kilbridge test probleminde Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te kolaylıkla görülmektedir.

6.5.3. Çıkarım

Değişkenliğin hat üzerinde düzgün dağıtılması performansı olumlu yönde etkileyecektir.

İspat

Hopp ve Spearman (2000: 305) bir üretim hattındaki değişkenliğin hattın ilk istasyonlarında artmasının hattın sonlarına doğru eşitlenmesine göre performansı daha kötü etkileyeceğini söylemiştir. Ancak bu durum geleneksel iş yükü dağılımı durumlarında söz konusudur. MHDP’de öncelik ilişkileri ve görevlerin bölünemez oluşu istenilen görevin en iyi performansı sağlayacak uygun bir istasyona atanmasını engellemektedir. Buna rağmen görevlerin atanabileceği istasyon aralıkları düşünülerek değişkenliğin performansı en iyileyecek şekilde dağıtılması önem kazanmaktadır. Şekil 6.3 ve Şekil 6.6 arası incelendiğinde özellikle değişkenlik arttıkça Eş.6.2’nin sağladığı bir avantaj olarak değişkenliğin hatta mümkün olduğu kadar dengeli veya son istasyonlara doğru yönlendirilmiş olduğu görülür.

6.5.4. Çıkarım

Değişkenlik dengesizliğinin görüldüğü durumlarda istasyon iş yükleri, değişkenlik arttıkça, hattın ortasına doğru artarken ortasından sonra azalarak denge sağlanmıştır.

İspat

Şekil 6.3 ile Şekil 6.6 arası incelendiğinde bu sonuç kolaylıkla görülebilmektedir. Bu durumun ortaya çıkış nedeni Çıkarım 6.5.1 ve 6.5.2’de bahsedilenler ile benzerdir.

Yukarıda verilen sonuçlar, performans değerlendirmesi ve MHDP’den gelen durumlar göz önünde bulundurulduğunda ortaya çıkan sonuçlardır. Bu durumları etkileyen bir etken ise test problemlerindeki görev sürelerinin dağılımıdır. Eğer test probleminde görev süreleri daha düzgün ve bir ortalama değer etrafında yayılıyorsa, hat dengesi daha çok çanak etkisine veya düzgün bir hat dengesine benzeyecektir. Ancak test problemindeki görev süreleri arasındaki dağılım yüksek yani çok düşük ile çok yüksek görev sürelerine sahip görevler var ise, hat dengesi daha çok değişkenlik dengesizliği gösterecektir. Bu durum Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te verilen Kilbridge test probleminde 21 numaralı görevde

görülmektedir. Test probleminde 21 numaralı görevin süresi 55 zaman birimidir ve bu süre görevin bir istasyona tek başına atanmasını gerektirecek kadar büyüktür. Bu durumda bu istasyonun verilen bir değişkenlik katsayısı altında standart sapması buna bağlı olarak da değişkenliği yüksek olacaktır. Bu görevin E_i ve L_i değerleri ile atanabileceği istasyon numarası aralığı düşünüldüğünde, en iyi görev atamasını ve değişkenliği etkileyeceği aşikârdır.

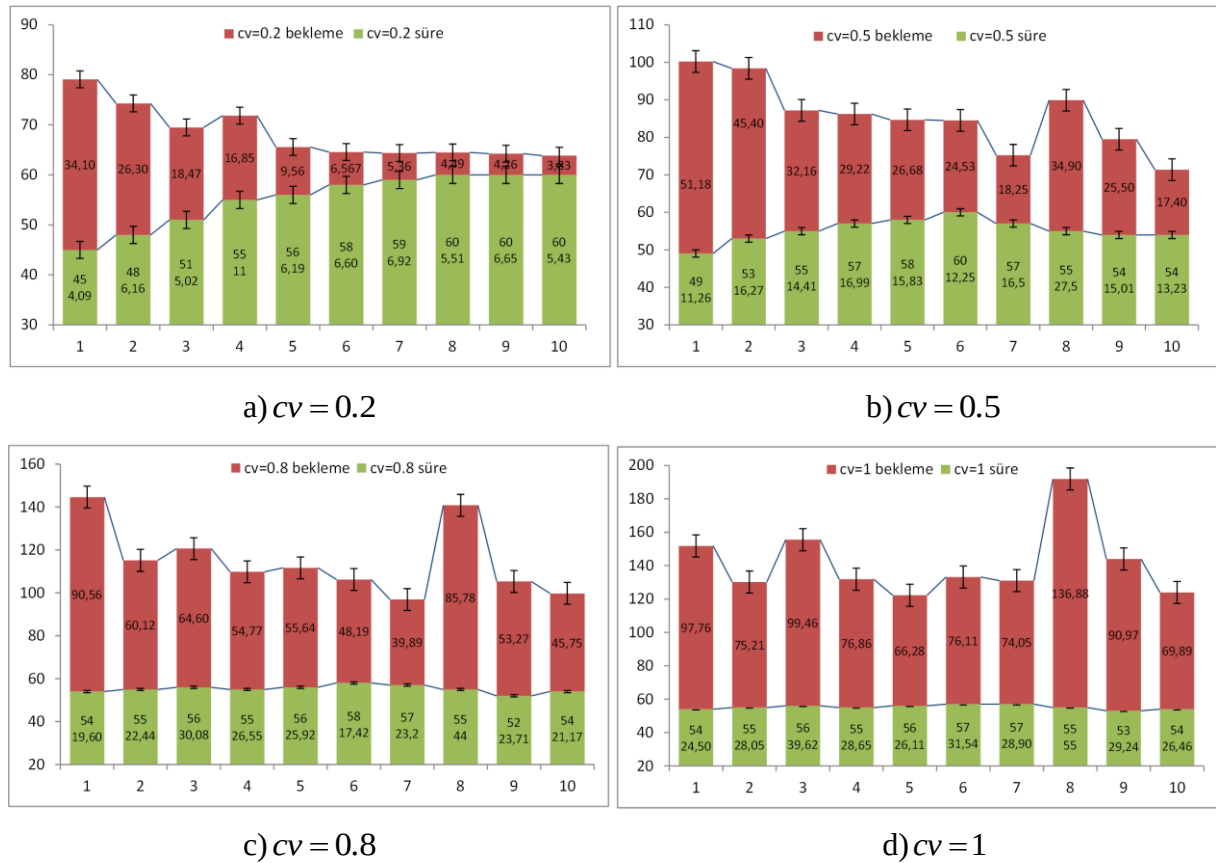
6.5.2. Bekleme süresi analizi

Bu bölümde iş parçalarının değişkenliklerden kaynaklanan istasyonlarda bekleme süreleri üzerinde durulacaktır. Ele alınan montaj hattı stokastik görev zamanlarına ve gelişler arası zamana sahip olduğu için istasyon iş yüklerinin kesin süreler olarak belirlenmesi mümkün olamamaktadır. Dolayısıyla iş parçalarının istasyonlardaki işlem sürelerinin belirsizliği istasyonlar arası beklemelere neden olacaktır. İş parçalarının istasyonlardaki bekleme süreleri Eş. 6.4 kullanılarak uygun parametreler ile her bir istasyon için tahmin edilebilmektedir. Kilbridge 10 istasyona sahip test problemi için örnek bir bekleme süresi grafiği Şekil 6.7’de verilmiştir.

Şekil 6.7’de görülen ilginç bir durum, bu grafiklerin Şekil 6.4’te istasyon süreleri ile ilgili olduğu grafiği tamamladığıdır. Yani bekleme süreleri Şekil 6.4’te istasyon sürelerinin oluşturduğu iniş ve çıkışların tersi seyir izlemiştir. Eğer bir istasyonda değişkenlik yüksek ise bekleme sürelerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum Eş. 6.4’te v teriminin artmasından ileri gelmektedir ve stokastik üretim hatları literatüründe bilinen bir gerçek olan değişkenliğin yüksek olduğu yerde bekleme sürelerinin yüksek olacağı durumu ile örtüşmektedir (Buzacott ve Shanthikumar, 1993). Ancak MHDP’nin kendine özgü kısıtlamalarının bekleme sürelerinde de etkili olduğu görülmektedir. Örneğin görev süresi yüksek olan bir işin tek bir istasyona atanması o istasyondaki işlem süresi değişkenliğinin yüksek olmasına neden olduğu için sekizinci istasyonda bekleme süresi yüksek gerçekleşmiştir (Bkz. Şekil 6.4). Ayrıca ilk istasyonda bekleme sürelerinin yüksek olmasının nedeni ilk istasyonun cv_A^2 değerinin yüksek olmasından ileri gelir. Daha sonra Eş. 6.2 ile değişkenlik istasyonlar arasında dönüştürülerek aktarılmaktadır.

6.5.3. WIP analizi

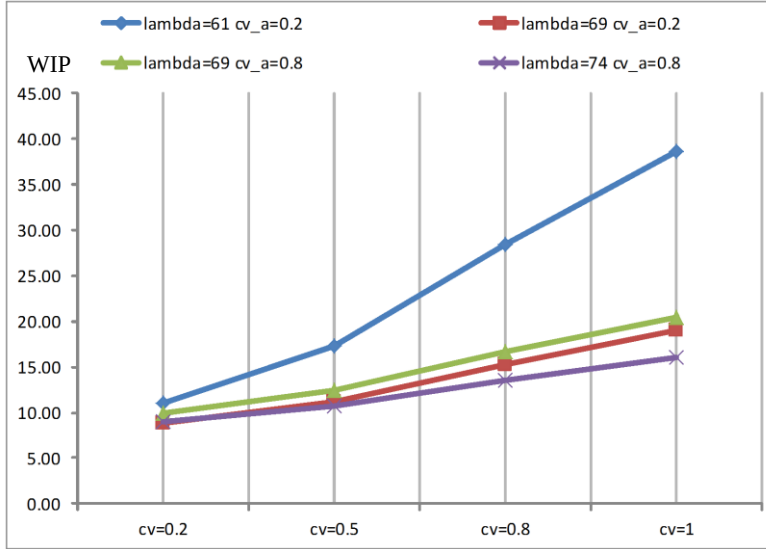
Bu bölümde amaç fonksiyonu WIP'in model parametreleri ile değişimi analiz edilecektir. Şüphesiz WIP Eş. 6.5'ten de anlaşılacağı üzere değişkenlik ve görev atamalarından etkilenir.



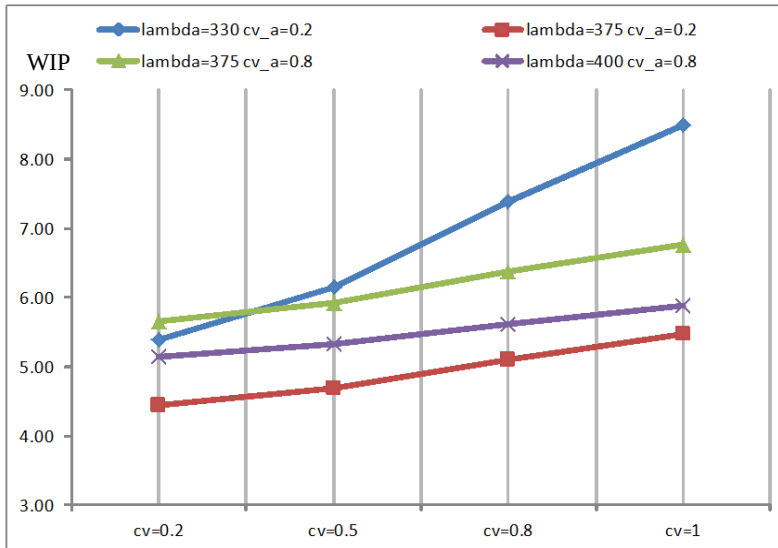
Şekil 6.7. Kilbridge 10 istasyon test problemi için bekleme süreleri ($1/\lambda = 69, cv_A^2 = 0,8$)

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da örnek olarak ele alınan test problemleri için farklı $1/\lambda$ ve cv değerlerine göre WIP değişimi gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde talepler arası geliş zamanı arttıkça aynı cv ve cv_A^2 (örneğin 1 ve 0,2) değerleri için WIP miktarı düşmüştür. Bunun nedeni talepler arası geliş oranının artması ile istasyon kullanım oranının artması, bu durumun da Eş. 6.5'in u teriminin artmasına neden olmasıdır. Eğer aynı $1/\lambda$ (örneğin Wee-Mag için 375) değeri için aynı $cv = 0,8$ değerinde cv_A^2 arttıkça WIP miktarının da arttığı görülmektedir. Ayrıca WIP miktarı için Bölüm 5.6.3'te bahsedilen durum bu bölümde ele alınan test problemleri için de geçerlidir (Bkz. Şekil 5.9).

Bu bölümde tartışılan durumlar örnek iki veri için test edilmesine rağmen Bölüm 5’te test edilen problemlerin sonuçları da bu iki örnek test probleminden elde edilen sonuçlar ile benzerdir. Yani Bölüm 6.5.1, 6.5.2 ve 6.5.3’te bahsedilen durumlar bu test problemlerinde de görülmüştür. Örnek test problemleri elde edilen sonuçlar itibari ile genel tüm değerlendirmelerin yapılmasına imkân verdiği için seçilmişlerdir.



Şekil 6.8. Kilbridge 10 istasyon test problemi için WIP miktarı



Şekil 6.9. Wee-Mag 5 istasyon test problemi için WIP miktarı

Tez çalışmasının bu bölümünde stokastik montaj hattı dengeleme problemleri için ayrıştırma modeline dayalı bir doğrusal olmayan stokastik model önerilmiştir. Modelin

geliştirilmesinde büyük boyutlu problemler ve gerçek hayat problemlerinin çözümü amaçlanmıştır. Önerilen model MHDP'ye özgü kısıtların yanı sıra hat performansının ölçülmesi için gerekli ifadelerin kapalı form ifadeler ile kısıt olarak eklendiği bir stokastik modeldir. KP kullanılarak önerilen model çözülmüştür. Modelin etkinliğinin test edilmesi için elde edilen son iyi çözüm simülasyon ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar önerilen modelin MHD ve performans değerlendirmesinde etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Model sonuçları istasyon iş yükü, bekleme süresi ve WIP sayıları olarak üç farklı performans ölçütü ile değerlendirilmiş ve çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur. Sonuçlar değerlendirildiğinde, istasyon sürelerinin test probleminin görev süresi dağılımına ve değişkenlik katsayısına bağlı olarak ya kullanım oranları artan şekilde ya da değişkenlik dengesizliği gösterecek şekilde dengelendiği görülmüştür. Buna bağlı olarak istasyonlara atanan görev kombinasyonlarının da değişkenliğe göre farklılık gösterdiği söylenebilir. Değişkenlik dengesizliği görülen durumlarda değişkenliğin artması ile birlikte istasyon sürelerinin hattın ortasına doğru artarken ortasından sonra azalarak dengelendiği görülmüştür.

Bekleme sürelerinin istasyon süreleri grafiklerini tamamlayacak şekilde aksi bir yönelim gösterdiği görülmüştür. Genel olarak bekleme sürelerinin istasyon iş yükünün yüksek olduğu istasyonlarda düşük, düşük olduğu istasyonlarda yüksek olarak gerçekleştiği söylenebilir.

WIP miktarları açısından analizler değerlendirildiğinde değişkenlik arttıkça toplam hat WIP miktarının arttığı görülmüştür. Aynı görev süresi ve talepler arası değişkenlik değeri için gelişler arası zaman arttıkça WIP miktarı azalmıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

Montaj hattı dengeleme, fabrikaların kuruluş aşamasında ilk defa veya ilerleyen zamanlarda değişken üretim şartlarına bağlı olarak yeniden ele alınan önemli bir üretim problemidir. Gelişen teknoloji, değişen müşteri talepleri ve üretim sistemi parametrelerinde meydana gelen değişkenlikler montaj hatlarında tasarım problemini ortaya çıkarmıştır. Literatürde MHD çalışmaları daha çok ilk dengeleme konusunda olmuştur ve tasarım problemi konusunda daha az çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında montaj hatlarında meydana gelen değişkenliklerden dolayı ortaya çıkan tasarım ve performans problemi incelenmiştir.

Yeniden dengeleme problemleri deterministik ortamda müşteri taleplerinin, makine teknolojilerinin değişmesi veya yeni ürün modelinin eklenmesi gibi nedenlerden ortaya çıkmaktadır. Bu tip problemler MHDP literatüründe deterministik tip-2 problemi olarak ele alınmıştır. Ayrıca değişen şartlar görevler arasında çeşitli atama kısıtlarının da ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bazı görevlerin bir arada atanması, bazılarının atanmaması veya bazı görevler arasında belirli bir mesafenin olması karar verici tarafından istenebilmektedir. Deterministik tip-2 problemlerinin çözümünde genellikle matematiksel model veya sezgisel algoritmalarından faydalanılmıştır. Bu tez çalışmasında deterministik atama kısıtlı tip-2 MHDP için bir kısıt programlama modeli önerilmiştir. Önerilen model verilen bir istasyon sayısı için çevrim zamanının en küçüklenmesini amaç olarak kullanmaktadır. Literatürde konu ile ilgili bir kısıt programlama çalışması yapılmasına rağmen atama kısıtlarının da dikkate alındığı bir çalışma yapılmamıştır. Önerilen kısıt programlama modelinin performansı test problemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Problemin matematiksel modeli ile sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Test sonuçlarına göre önerilen kısıt programlama modeli etkili sonuçlar vermiştir. MHDP'nin modellenmesi için kısıt programlamanın alternatif bir modelleme tekniği olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Gerçek hayatta dengelenmiş hatların zamanla değişkenliğin etkisi ile deterministik bir yapıdan stokastik bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Hatta görülen bu değişkenlik talepler, görev süreleri ve hattaki istasyonlar arasındaki süreçleri etkilemektedir. Bu

durumda hatta beklemeler ve aç kalma durumları ortaya çıkmaktadır. Hattın bu değişkenlikleri de göz önünde bulundurularak tip-2 probleminin çözülmesi montaj hattının daha esnek ve sağlam bir yapıda olmasını sağlayacaktır. Tez çalışmasında üretim hatlarında stokastiklikten dolayı meydana gelen işlem süreci ve akış süreci değişkenliklerini de dikkate alan doğrusal olmayan stokastik bir model ve çözüm prosedürü önerilmiştir. Çözüm prosedürü uygun görev atama kombinasyonunun üretilmesi için kullanılan kısıt programlama modelinden ve bu uygun çözümlerin performansının değerlendirilmesi için kullanılan kuyruk ağları modelinden oluşmaktadır. Performans değerlendirme yaklaşımı olarak difüzyon yaklaşımından faydalanılmıştır. Prosedür iteratif bir şekilde üretilen uygun atamaların performans değerlerini hesaplamakta ve sonuç olarak en iyi performans değerine sahip görev atamalarını tespit etmektedir. Önerilen modelde istasyon kullanım oranlarının düzgünleştirilmesi için düzgünlük indeksi amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Ayrıca hattaki toplam ürün sayısı da bir performans parametresi olarak değerlendirilmiştir. Önerilen çözüm prosedürünün geçerliliği test problemleri ile kanıtlanmıştır. Model parametrelerinde meydana gelecek değişkenliğin hat performansına etkisini araştırmak için çeşitli çıkarımlarda bulunulmuş, bu çıkarımların yönetime ne tür bilgiler sağlayacağı tartışılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçların anlamlılığı montaj hatlarında ortaya çıkan çanak etkisi ile değerlendirilmiştir. Kullanım oranı ve hattaki toplam ürün sayısı açısından elde edilen hat dengelerinin çanak etkisi gösterdiği kanıtlanmıştır.

Çalışmada büyük boyutlu problemlerin çözümünde kullanılabilecek performans değerlendirmesinin iteratif algoritmalar yerine kapalı form ifadeler ile belirtildiği yeni bir stokastik model önerilmiştir. Kapalı form ifadeler ile performans ölçütlerinin modelde kısıt olarak modellenebilmesi sağlanarak iyi çözümlere daha hızlı ulaşılabilmek imkânı sağlanmıştır. Önerilen model temelde ayrıştırma tekniğine dayanmaktadır. Ayrıştırma tekniği bir kuyruk ağındaki her bir düğümü (istasyonu) ayrı ayrı ele alarak giriş, işlem ve çıkış sürecini parametrik olarak değerlendirmektedir. Önerilen model hatta oluşan değişkenliğin hat boyunca nasıl aktarıldığının tahminini yapar. Elde edilecek bu değerler ile performans değerlendirmesi yapılır ve en iyi performansa sahip yeni hat dengesi belirlenir. Modelin çözümü için doğrusal olmayan modellerin programlanmasında matematiksel programlamaya göre çok kolaylık ve esneklik sağlayan kısıt programlama kullanılmıştır. 7 200 saniye hesaplama zamanı ile sınırlandırılan test problemleri 30 ile 94 iş arasında görev sayısına ve 4 ile 10 arasında istasyon sayısına sahip orta ve büyük

boyutlu problemlerdir. Bu test problemleri önerilen modelin geçerliliğini kanıtlamak için kullanılmıştır. Test sonuçları değişkenliğin istasyon iş yükleri, bekleme süreleri ve WIP miktarları üzerindeki etkilerini araştırmak için değerlendirilmiştir. Hem pratik hem de yönetsel ilginç sonuçlara ulaşılmış ve bunlar rapor edilmiştir.

Bu tez kapsamında ele alınan problemler gerçek hayatta birçok işletmenin karşı karşıya kaldığı problemlerdir. Özellikle değişkenliğin getirdiği belirsiz ortamın modellenmesi ve değişkenlik hakkında bilgilere sahip olunması yönetimin daha isabetli kararlar almasını sağlamaktadır. Bu isabetli kararlar genellikle ekonomik kazanımı da beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda tez çalışmasının ülke ekonomisine katkı sağlayacağı da söylenebilir.

Bu tez çalışmasının katkılarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

- Tip-2 deterministik MHDP'ye atama kısıtlarının da dâhil edilmesi ile yeni bir kısıt programlama modeli önerilmiştir.
- Üretim hatlarında ortaya çıkan değişkenliğin modellenmesi ve hat dengesine etkisinin araştırılması için yeni bir doğrusal olmayan model ve çözüm prosedürü geliştirilmiştir.
- Montaj hatlarında çanak etkisinin değişkenlik ile davranışı değerlendirilmiştir.
- Özellikle büyük boyutlu problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere ayrıştırma modeline dayalı yeni bir doğrusal olmayan model geliştirilmiştir.
- Geliştirilen modeller hakkında teorik ve yönetsel çıkarımlarda bulunulmuş, bu çıkarımların sonuçları değerlendirilmiştir.

7.2. İleri Çalışma Önerileri

Bu tezde deterministik ve stokastik montaj hatları ele alınmış, yeni modeller ve çözüm önerilerinde bulunulmuştur. Ancak hem MHDP'nin çeşitliliği hem de hatlarda ortaya çıkan gerçek hayat problemlerinin akademik problemlerden farklılığı nedeniyle çözüm getirilmemiş birçok problem bulunmaktadır. Bu problemleri birer ileri çalışma önerisi olarak aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Kısıt programlama diğer MHDP tipleri için bir çözüm yöntemi olarak kullanılabilir. KP, matematiksel programlama ile birlikte birçok kombinatoriyal problemin çözümünde

etkili olarak kullanılmaktadır. Karmaşık MHDP için KP ve matematiksel model entegrasyonundan oluşan bir çözüm önerisi getirecek çalışma ilgi çekici olacaktır. KP esnek dil yapısı nedeniyle probleme özgü arama stratejileri geliştirmek için de uygun bir modelleme tekniğidir. MHDP'nin genel yapısı düşünülerek yeni arama stratejileri geliştirilebilir. Büyük boyutlu problemlerin çözümünde KP'nin sezgisel veya meta sezgisel modeller ile entegrasyonu daha hızlı bir şekilde iyi çözümlere ulaşılmasında etkili bir çözüm yöntemi olabilir.

- Performans değerlendirme yöntemi olarak kullanılan kuyruk ağları çok çeşitli üretim hatlarının performans değerlendirmesinde kullanılmaktadır. Bu üretim hatları arasında çok ürünlü hatlar, karmaşık ağ yapısına sahip hatlar, paralel istasyonlara sahip hatlar örnek verilebilir. Problem özelliklerine göre geliştirilmiş uygun kuyruk ağı yaklaşımları belirlenerek, bu hatların özelliklerini taşıyan MHDP (paralel, çok ürünlü hatlar gibi) için çözüm önerileri getirilebilir.
- Giriş bölümünde bahsedilen üç temel üretim probleminin birlikte ele alındığı problemler de ilgi çekici bir diğer alandır. Literatürde MHDP için istasyonlar arasındaki bekleme yerlerinin sınırlı olduğu çalışmalara çok az rastlanmaktadır. Hem montaj hatlarının dengelenmesi hem de bekleme yeri kapasitesi atama problemleri yeni bir çalışma alanı olabilir. Bekleme yeri kapasitesinin sınırlı olması durumunda tez çalışmasında önerilen özellikle ayrıştırma modeli kolaylıkla uyarlanabilecektir. Ayrıca hatta istenen toplam bekleme yeri kapasitesinin optimizasyonu da kısıt programlama modelinde toplam bekleme yeri kapasitesinin amaç fonksiyonu olarak kabul edilmesi ile gerçekleştirilebilir.
- Hat performansını olumsuz yönde etkileyen WIP miktarlarının kontrolü daha önce belirtildiği üzere montaj hattında istasyonlar arasına bekleme yerleri ekleyerek sağlanabileceği gibi hattı kapalı kuyruk ağı olarak modelleyerek de sağlanabilir. Bölüm 2.2.2'de belirtildiği üzere kapalı kuyruk ağlarında sistemdeki ürün sayısı sabittir. Bu varsayım altında hat dengesinin ve görev atamasının durumu değerlendirilebilir.
- Hat performansını etkileyen en önemli parametre değişkenlik katsayısıdır. Eğer bir hatta değişkenlik kontrol altına alınabilirse hem daha iyi hat dengesi elde edilebilir hem de uzun süre bu hat dengesi ile ihtiyaca cevap verilebilir. Bu sebeple hattaki değişkenliklerin özellikle stokastik süreçler ve Markov zincirleri gibi teknikler kullanılarak modellenmesi ileri bir çalışma olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Ağpak, K. and Gökçen, H. (2005). Assembly line balancing: Two resource constrained cases. *International Journal of Production Economics*, 96, 129-140.
- Ağpak, K. and Gökçen, H. (2007). A chance-constrained approach to stochastic line balancing. *European Journal Of Operational Research*, 180(3): 1098–1115.
- Alağaç, H. M., Yüzükırmızı, M. ve Türker, A. K. (2013). Stokastik montaj hatlarının kısıt programlama ve kapalı kuyruk ağları ile dengelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 231-240.
- Andres, C., Miralles, C. and Pastor, R. (2008). Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 187(3), 1212–1223.
- Apt, K. R. (2003). *Principles of constraint programming*. New York: Cambridge University Press, 54-80.
- Asadathorn, N. and Chao, X. (1999). A decomposition approximation for assembly-disassembly queueing networks with finite buffer and blocking. *Annals of Operations research*, 87, 247-261.
- Ayazi, S., Hajizadehb, A. E., Nooshabadic, M. R., Jalaiea, H. and Moradi, Y. (2011). Multi-objective assembly line balancing using genetic algorithm. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2, 863–872.
- Azaron, A. and Kianfar, F. (2006). A multi-objective lead time control problem in multistage assembly systems using an interactive method. *Applied Mathematics and Computation*, 176, 609–620.
- Azaron, A., Katagari, H., Kato, K. and Sakawa, M. (2006). Modelling complex assemblies as a queueing network for lead time control. *European Journal of Operational Research*, 174, 150–168.
- Battaia, O. and Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277.
- Bautista, J. and Pereira, J. (2002). Ant algorithms for assembly line balancing. *Lecture Notes in Computer Science*, 2463, 65–75.
- Bautista, J. and Pereira, J. (2007). Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 177, 2016–2032.
- Bautista, J., Suarez, R., Mateo, M. and Companys, R. (2000, 24-28 April). *Local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between tasks*. Paper presented at the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, 2404–2409.

- Baybars, İ. (1986). An efficient heuristic method for the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 24(1), 149-166.
- Bazara, S. M. and Jarvis, J. J. (1977). *Linear programming and network flows* (First edition). USA: John Wiley and Sons, 39-66.
- Becker, C. and Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168: 694–715.
- Bitran, G. R. and Dasu, S. (1992). A review of open queueing network models of manufacturing systems. *Queueing systems*, 12(1-2), 95-133.
- Bitran, G. R. and Morabito, R. (1996). Open queueing networks: optimization and performance evaluation models for discrete manufacturing systems. *Production and Operations Management*, 5(2), 163-193.
- Bitran, G. R. and Tirupati, D. (1989). Tradeoff curves, targeting and balancing in manufacturing queueing networks. *Operations Research*, 37(4), 547-564.
- Blumenfeld, D. E. (1989). Performance comparison of assembly systems with fixed and flexible cycle times. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1(3), 207-222.
- Bockmayr, A. and Piskur, N. (2001, 18-20 June). *Solving an assembly line balancing problems by combining IP and CP*. Paper presented at the 6th Annual Workshop of ERCIM Working Group on Constraints, Prague, Czech Republic.
- Bolch, G., Greiner, S., Meer, H. and Trivedi, K. S. (2006). *Queueing networks and markov chains modeling and performance evaluation with computer science applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, 463-470.
- Boysen, N. and Fliedner, M. (2008). A versatile algorithm for assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 184, 39–55.
- Boysen, N., Fliedner, M. and Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183, 674-693.
- Brady, W. and Drury, C. G. (1969). The dependence of the coefficient of variation of a work time distribution of number of elements in the work task. *International Journal of Production Research*, 7(4): 311-321.
- Brailsford, S. C., Chris, N. P. and Barbara, M. S. (1999). Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications. *European Journal of Operational Research*, 119, 557-581.
- Bryton, B. (1954). *Balancing of a continuous production line*, Yüksek Lisans Tezi, Northwestern University, Northwestern, 4-9.
- Buzacott, J. A. and Shanthikumar, J. G. (1993). *Stochastic models of manufacturing systems*. New Jersey: Prentice Hall, 43-90, 153-214.

- Carnahan, B. J., Norman, B. A. and Redfern, M. S. (2001). Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *IIE Transactions*, 33, 875–887.
- Carraway, R. L. (1989). A dynamic programming approach to stochastic assembly line balancing. *Management Science*, 35(4), 459-471.
- Çerçioğlu, H. (2009). *Stokastik paralel montaj hattı dengeleme problemi için yeni modeller*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-28.
- Corominas, A., Ferrer, L. and Pastor, R. (2011). Assembly line balancing: general resource-constrained case. *International Journal of Production Research*, 49(12), 3527-3542.
- Czachórski, T., Grochla, K., Nycz, T. and Pekergin, F. (2010). A diffusion approximation model for wireless networks based on IEEE 802.11 standard. *Computer Communications*, 33, 86-92.
- Curry, G. L. and Feldman, R. M. (2011). *Manufacturing systems modeling and analysis* (Second edition), New York: Springer, 32, 125-133.
- Dallery, Y. and Gershwin, S. B. (1992). Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results. *Queueing systems*, 12(1-2), 3-94.
- Das, B., Garcia-Diaz, A., MacDonald, A. C. and Ghoshal, K. K. (2010). A computer simulation approach to evaluating bowl versus inverted bowl assembly line arrangement with variable operation times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 15–24.
- Dechter, R. (2003). *Constraint processing*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1-20.
- Deckro, R.F. (1989). Balancing cycle time and workstations. *IIE Transactions*, 21, 106–111.
- Demir, L., Tunali, S. and Eliiyi, D. T. (2014). The state of the art on buffer allocation problem: a comprehensive survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(3), 371-392.
- Domes, F. and Neumaier, A. (2010). Constraint propagation on quadratic constraints. *Constraints*, 15(3), 404-429.
- Duenyas, I. and Hopp, W. J. (1993). Estimating the throughput of an exponential CONWIP assembly system. *Queueing Systems*, 14, 135-157.
- Erel, E. and Sarin, S. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning and Control*, 9(5), 414- 434.
- Gadidov, R. and Wilhelm, W. (2000). A cutting plane approach for the single-product assembly system design problem. *International Journal of Production Research*, 38, 1731–1754.

- Gao, J., Sun, L., Wang, L. and Gen, M. (2009). An efficient approach for type II robotic assembly line balancing problems. *Computers and Industrial Engineering*, 56(3), 1065-1080.
- Gökçen, H. (1994). *Karışık Modelli Deterministik Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Yeni Modeller*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-21.
- Gökçen, H. and Baykoç, Ö. (1999). A new line remedial policy for the paced lines with stochastic task times. *International Journal of Production Economics*, 58(2), 191-197.
- Govil, M. K. and Fu, M. C. (1999). Queueing theory in manufacturing. A survey. *Journal of Manufacturing Systems*, 18(3), 214-240.
- Gross, D., Shortle, J. F., Thompson, J. M. and Harris, C. M. (2008). *Fundamentals of queueing theory* (Forth edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 2, 219,284.
- Hackman, S., Magazine, M. J. and Wee, T. (1989). Fast, effective algorithms for simple assembly line balancing problems. *Operations Research*, 37(6), 916-924.
- Hamta, N., Ghomi, S. F., Jolai, F. and Shirazi, M. A. (2013). A hybrid PSO algorithm for a multi-objective assembly line balancing problem with flexible operation times, sequence-dependent setup times and learning effect. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 99-111.
- Harrison, J. M. (1973). Assembly like queues. *Journal of Applied Probability*, 10: 354-367.
- Hazır, Ö. and Dolgui, A. (2013). Assembly line balancing under uncertainty: Robust optimization models and exact solution method. *Computers and Industrial Engineering*, 65(2), 261-267.
- Helgeson, W. and Birnie, D. (1961). Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. *Journal of Industrial Engineering* , 12(6), 384-389
- Hemachandra, N. and Eedupuganti, S. K. (2003). Performance analysis and buffer allocations in some open assembly systems. *Computers and Operations Research*, 30(5), 695-704.
- Hillier, F. S. and So, C. K. (1991). The effect of the coefficient of variation of operation times on the allocation of storage space in production line systems. *IIE Transactions*, 23(2), 198-206.
- Hillier, F. S. and So, K. C. (1996). On the simultaneous optimization of server and work allocations in production line systems with variable processing times. *Operations Research*, 44(3), 435-443.
- Hillier, M. (2013). Designing unpaced production lines to optimize throughput and work-in-process inventory. *IIE Transactions*, 45(5), 516-527.

- Hopp, W. J. and Spearman, M. L. (2000). *Factory physics: Foundations of manufacturing management* (Second edition). USA: McGraw-Hill, 248-330.
- Hopp, W. J., Spearman, M. L., Chayet, S., Donohue, K. L. and Gel, E. S. (2002). Using an optimized queueing network model to support wafer fab design. *IIE Transactions*, 34(2), 119-130.
- Huang, H. and Wang, Z. (2010). Solving coupled task assignment and capacity planning problems for a job shop by using a concurrent genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 48(24), 7507-7522.
- IBM. (2013a). ILOG OPL 12.6 Language Manual. ILOG S. A., USA.
- IBM. (2013b). CP Optimizer 12.6 User's Manual. ILOG S. A., USA.
- Kanet, J. C., Ahire, S. L. and Gorman, M. F. (2004). Constraint programming for scheduling. In J. Y. T. Leung (Ed.), *Handbook of Scheduling*. Boston: CRC Press, 47(1-21).
- Kendall, D. G. (1953). Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of imbedded Markov chains. *The Annals of Mathematical Statistics*, 24, 338-354.
- Kilinc, O. (2010). A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1), 329-338.
- Kim, Y. K., Kim, Y. and Kim, Y. J. (2000). Two-sided assembly line balancing: A genetic algorithm approach. *Production Planning and Control*, 11, 44-53.
- Kim, Y. K., Song, W. S. and Kim, J. H. (2009). A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing. *Computers and Operations Research*, 36(3), 853-865.
- Kingman, J. F. C. (1961). The single server queue in heavy traffic. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 57(4), 902-904.
- Klein, R. and Scholl, A. (1996). Maximizing the production rate in simple assembly line balancing - A branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research*, 91, 367-385.
- Kobayashi, H. (1974a). Application of the diffusion approximation to queueing networks I: Equilibrium queue distributions. *Journal of the ACM*, 21(2), 316-328.
- Kobayashi, H. (1974b). Application of the diffusion approximation to queueing networks II: Nonequilibrium distributions and applications to computer modeling. *Journal of the ACM*, 21(3), 459-469.
- Kobayashi, H. and Ren, Q. (1993, 23-26 May). A diffusion approximation analysis of an ATM statistical multiplexer with multiple types of traffic.-I. Equilibrium state solutions. Paper presented at the IEEE International Conference on Communications, Geneva.

- Kottas, J. F. and Lau, H. (1976). A total operating cost model for paced lines with stochastic task times. *AIIE Transactions*, 8(2), 234-240.
- Kottas, J. F. and Lau, H. (1981). A stochastic line balancing procedure. *International Journal of Production Research*, 19(2), 177-193.
- Kottas, J. and Lau, H. (1973). A cost oriented approach of stochastic line balancing. *AIIE Transactions*, 5(2): 164-171.
- Kuo, R. J. and Yang, C. Y. (2011). Simulation optimization using particle swarm optimization algorithm with application to assembly line design. *Applied Soft Computing*, 11(1), 605-613.
- Lagershausen, S. (2013). *Performance Analysis of Closed Queueing Networks*. Berlin: Springer, 1-9.
- Lagershausen, S., Manitz, M. and Tempelmeier, H. (2013). Performance analysis of closed-loop assembly lines with general processing times and finite buffer spaces. *IIE Transactions*, 45(5): 502-515.
- Lapierre, S. D. and Ruiz, A. B. (2004). Balancing assembly lines: An industrial case study. *Journal of Operational Research Society*, 55, 589–597.
- Lapierre, S. D., Ruiz, A. and Soriano, P. (2006). Balancing assembly lines with tabu search. *European Journal of Operational Research*, 168, 826–837.
- Lazaro, A. R. and Perez, C. J. L. (2009). Dynamic analysis of an automobile assembly line considering starving and blocking. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25, 271–279.
- Lee, H. F. and Johnson, R. V. (1991). A line-balancing strategy for designing flexible assembly systems. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 3(2), 91-120.
- Lee, T. O., Kim, Y. and Kim, Y. K. (2001). Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers and Industrial Engineering*, 40, 273–292.
- Li, H. and Womer, K. (2012). Optimizing the supply chain configuration for make-to-order manufacturing. *European Journal of Operational Research*, 221(1), 118-128.
- Lipper, E. H. and Sengupta, B. (1986). Assembly-like queues with finite capacity: bounds, asymptotics and approximations. *Queueing Systems: Theory and Applications*, 1, 67-83.
- Little, J. D. D. (1961). A proof for the queueing formula $L=\lambda W$. *Operations Research*, 9, 383-387
- Liu, C. M. and Chen, C. H. (2002). Multi-section electronic assembly line balancing: a case study. *Production Planning & Control*, 13(5), 451-461.

- Liu, S. B., Ong, H. L. and Huang, H. C. (2003). Two bi-directional heuristics for the assembly line type II problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(9-10), 656-661.
- Liu, S., Ong, H. and Huang, H. (2005). A Bi-directional heuristic for stochastic assembly line balancing problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technoogy*, 25, 71-77.
- Lovell, D. J., Vlachou, K., Rabbani, T. and Bayen, A. (2013). A diffusion approximation to a single airport queue. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 33, 227-237.
- Lustig, I. and Puget, J. F. (2013). Constraint Programming. In S. I. Gass and M. C. Fu (Eds.), *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, New York: Springer, 267-273.
- Manitz, M. (2008). Queueing-model based analysis of assembly lines with finite buffers and general service times. *Computers and Operations Research*, 35, 2520-2536.
- Manitz, M. (2015). Analysis of assembly/disassembly queueing networks with blocking after service and general service times. *Annals of Operations Research*, 226(1), 417-441.
- Manitz, M. and Tempelmeier, H. (2012). The variance of inter-departure times of the output of an assembly line with finite buffers, converging flow of material, and general service times. *OR Spectrum*, 34(1), 273-291.
- Mansoor, E. M. (1964). Assembly line balancing-an improvement on the ranked positional weight technique. *Journal of Industrial Engineering*, 15, 73-78.
- Marchal, W. G. (1978). Some Simpler Bounds on the Mean Queuing Time. *Operations Research*, 26(6), 1083-1088.
- Medhi, J. (2002). *Stochastic models in queueing theory*. USA California: Academic Press, 360.
- Mendes, A. R., Ramos, A. L., Simaria, A. S. and Vilarinho, P. M. (2005). Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line. *Computers and Industrial Engineering*, 49(3), 413-431.
- Miralles, C. (2005). *Solving procedures for the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centres for disabled*. Paper presented at the XI Escuela Latinoamericana de Verano en Investigacion de Operaciones, Villa de Leyva, Colombia.
- Modie, C. L. and Young, H. H., (1965). A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *Journal of Industrial Engineering*, 16, 23-29.
- Nearchou, A. C. (2008). Multi-objective balancing of assembly lines by population heuristics. *International Journal of Production Research*, 46(8), 2275-2297.

- Nkasu, M. M. and Leung, K. H. (1995). A stochastic approach to assembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 33(4), 975–991.
- Nourmohammadia, A. and Zandieh, M. (2011). Assembly line balancing by a new multi-objective differential evolution algorithm based on TOPSIS. *International Journal of Production Research*, 49(10), 2833–2855.
- Özcan, U. (2010). Balancing stochastic two-sided assembly lines: A chance-constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm”, *European Journal of Operational Research*, 205(1), 81-97.
- Papadopolous, H. T., Heavey, C. and Browne, J. (1993). *Queueing theory in manufacturing systems analysis and design*. London: Chapman & Hall, 8-12.
- Papadopoulos, H. T. and Heavey, C. (1996). Queueing theory in manufacturing systems analysis and design: A classification of models for production and transfer lines. *European Journal of Operational Research*, 92, 1-27.
- Pastor, R. and Corominas, A. (2000). Assembly line balancing with incompatibilities and bounded workstation loads. *Ricerca Operativa*, 30, 23–45.
- Pastor, R. and Ferrer, L. (2009). An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 47(11), 2943–2959.
- Pastor, R., Andres, C., Duran, A. and Perez, M. (2002). Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem with reduction of the task dispersion. *Journal of Operational Research Society*, 53, 1317–1323.
- Pastor, R., Ferrer, L. and García, A. (2007). Evaluating optimization models to solve SALBP. *Lecture Notes in Computer Science*, 4705, 791-803.
- Perkgoz, C., Azaron, A., Katagiri, H., Kato, K. and Sakawa, M. (2007). A multi-objective lead time control problem in multi-stage assembly systems using genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 180, 292-308.
- Pesant, G., Gendreau, M., Potvin, J. Y. and Rousseau, J. M. (1998). An exact constraint logic programming algorithm for the traveling salesman problem with time windows. *Transportation Science*, 32(1), 12-29.
- Pınarbaşı, M. (2010). *Esnek imalat sistemlerinin tasarım süreci ve performans analizinde kuyruk ağı modelleri*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 23-26.
- Puget, J. F. and Lustig, I. (2001). Constraint programming and maths programming. *The Knowledge Engineering Review*, 16(1), 5-23.
- Purnomo, H. D., Wee, H. M. and Rau, H. (2013). Two-sided assembly lines balancing with assignment restrictions. *Mathematical and Computer Modeling*, 57(1), 189-199.

- Rao, D. (1971). *Single and mixed model assembly line balancing methods for both deterministic and normally distributed work element times*, Yüksek Lisans Tezi, Oregon University, Oregon, 125-160.
- Rao, P. N. (1976). A generalization of the 'bowl phenomenon' in series production systems. *International Journal of Production Research*, 14(4), 437-443.
- Raouf, A. and Tsui, C. (1982). A new method for assembly line balancing having stochastic work elements. *Computers and Industrial Engineering*, 6(2), 131-148.
- Reiser, M. and Kobayashi, H. (1974). Accuracy of the diffusion approximation for some queueing systems. *IBM Journal of Research and Development*, 18(2), 110-124.
- Rekiek, B., De Lit, P. and Delchambre, A. (2002). Hybrid assembly line design and user's preferences. *International Journal of Production Research*, 40, 1095-1111.
- Rekiek, B., De Lit, P., Pellichero, F., Falkenauer, E. and Delchambre, A. (1999, 21-24 July). *Applying the equal piles problem to balance assembly lines*. Paper presented at the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Porto.
- Rekiek, B., De Lit, P., Pellichero, F., L'Eglise, T., Fouda, P., Falkenauer, E. and Delchambre, A. (2001). A multiple objective grouping genetic algorithm for assembly line design. *Journal of Intelligence Manufacturing*, 12, 467-485.
- Ren, Q. and Kobayashi, H. (1993, 6-11 September). *An application of the diffusion approximation to an ATM network*. Paper presented at the IEEE International Conference on Information Engineering, Singapore.
- Rossi, F., Beek, P. and Walsh, T. (2006). Introduction. In F. Rossi, P. van Beek and T. Walsh (Eds.), *Handbook of Constraint Programming*. Amsterdam: Elsevier Science, 3-10.
- Salveson, M. E. (1955). The assembly line balancing problem, *The Journal of Industrial Engineering*, 6, 18-25.
- Sarin, S. C., Erel, E. and Dar-El, M. (1999). A methodology solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. *International Journal of Management Science*, 27(5), 525-535.
- Sawik, T. (2002). Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line. *European Journal of Operational Research*, 143, 115-124.
- Scholl, A. (1993). Data of assembly line balancing problems, *Working Paper*, Technische Universität Darmstadt, 8-10.
- Scholl, A. (1999). *Balancing and Sequencing of Assembly Lines* (Second edition). Germany: Physica-Verlag Press, 1-19, 54-61.
- Scholl, A. and Vob, S. (1996). Simple assembly line balancing-heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2(3), 217-244.

- Scholl, A., Fliedner, M. and Boysen, N. (2010). ABSALOM: Balancing assembly lines with assignment restrictions. *European Journal of Operational Research*, 200, 688-701.
- Seyed-Alagheband, S. A., Ghomi, S. F. and Zandieh, M. (2011). A simulated annealing algorithm for balancing the assembly line type II problem with sequence-dependent setup times between tasks. *International Journal of Production Research*, 49(3), 805-825.
- Shanthikumar, J. G., Ding, S. and Zhang, M. T. (2007). Queueing theory for semiconductor manufacturing systems: a survey and open problems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(4), 513-522.
- Shin, D. (1990). An efficient heuristic for solving stochastic assembly line balancing problems. *Computers and Industrial Engineering*, 18(3), 285-295.
- Siala, M., Hebrard, E. and Huguet, M. J. (2015). A study of constraint programming heuristics for the car-sequencing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 38, 34-44.
- Silverman, F. and Carter, J. (1986). A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages", *Management Science*, 32(4), 455-463.
- Sivasankaran, P. and Shahabudeen, P. (2014). Literature review of assembly line balancing problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12), 1665-1694.
- Smith, J. M. and Daskalaki, S. (1988). Buffer space allocation in automated assembly lines. *Operations Research*, 36(2), 343-358.
- Smith, J. M., Cruz, F. R. and Van Woensel, T. (2010). Topological network design of general, finite, multi-server queueing networks. *European Journal of Operational Research*, 201(2), 427-441.
- Solnon, C. (2010). *Ant colony optimization and constraint programming*, London: ISTE Ltd, 27-50.
- Stecke, K. E. and Solberg, J. J. (1985). The optimality of unbalancing both workloads and machine group sizes in closed queueing networks of multi-server queues. *Operations Research*, 33, 882-910.
- Su, P. and Lu, Y. (2007, 24-27 August). *Combining genetic algorithm and simulation for the mixed-model assembly line balancing problem*. Paper presented at the IEEE Third International Conference on Natural Computation, Haikou.
- Suresh, G. and Sahu, S., (1994). Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. *International Journal of Production Research*, 32, 1801-1810.
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons, 18-19, 418.

- Terekhov, D. and Beck, J. C. (2008). A constraint programming approach for solving a queueing control problem. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 123-167.
- Terekhov, D., Beck, J. C. and Brown, K. N. (2009). A constraint programming approach for solving a queueing design and control problem. *INFORMS Journal on Computing*, 21(4), 549-561.
- Terekhov, D., Doğru, M. K., Özen, U. and Beck J. C., (2012). Solving two-machine assembly scheduling problems with inventory constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 120-134.
- Tiacci, L. (2012). Event and object oriented simulation to fast evaluate operational objectives of mixed model assembly lines problems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 24, 35-48.
- Tiacci, L. (2015). Coupling a genetic algorithm approach and a discrete event simulator to design mixed-model un-paced assembly lines with parallel workstations and stochastic task times. *International Journal of Production Economics*, 159, 319-333.
- Topaloğlu, S., Salum, L. and Supciller, A. A. (2012). Rule-based modeling and constraint programming based solution of the assembly line balancing problem. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3484–3493.
- Tuncel, G. and Topaloğlu, S. (2013). Assembly line balancing with positional constraints, task assignment restrictions and station paralleling: A case in an electronics company. *Computers and Industrial Engineering*, 64, 602-609.
- Uğurdağ, H., Rachamadugu, R. and Papachristou, C. A. (1997). Designing paced assembly lines with fixed number of stations. *European Journal of Operational Research*, 102, 488-501.
- Valle, C. D., Marquez, A. A., Gasca, R. M. and Toro, M. (2003). On selecting and scheduling assembly plans using constraint programming. *Lecture Notes in Computer Science*, 2774, 1329-1336.
- Vilarinho, P. M. and Simaria, A. S. (2002). A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 40, 1405–1420.
- Vilarinho, P. M. and Simaria, A. S. (2006). ANTBAL: An ant colony optimization algorithm for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 44, 291–303.
- Wee, T. S. and Magazine, M. (1981). An Efficient Branch and Bound Algorithm for Assembly Line Balancing-Part 2: Maximize the Production Rate, *Working Paper*, University of Waterloo.
- Wee, T. S. and Magazine, M. (1986). Assembly line balancing as generalized bin packing. *Operations Research Letters*, 1, 56–58.
- Wei, N. and Chao, M. (2011). A solution procedure for type E simple assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3), 824–830.

- Wilhelm, W. E. and Gadidov, R. (2004). A branch-and-cut approach for a generic multiple-product, assembly-system design problem. *INFORMS Journal on Computing*, 16, 39–55.
- Wu, K. and McGinnis, L. (2012). Performance evaluation for general queueing networks in manufacturing systems: Characterizing the trade-off between queue time and utilization. *European Journal of Operational Research*, 221(2), 328-339.
- Yao, D. W. and Buzacott, J. A. (1985). Queueing models for a flexible machining station Part I: The diffusion approximation. *European Journal of Operational Research* 19(2), 233-240.
- Zacharia, P. T. and Nearchou, A. C. (2012). Multi-objective fuzzy assembly line balancing using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(3), 615-627.
- Zeballos, L. J. (2010). A constraint programming approach to tool allocation and production scheduling in flexible manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(6), 725-743.
- Zhuang, L., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H. and Yee, C. Y. (1998). On the role of a queueing network model in the design of a complex assembly system. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 14(2), 153-161.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : PINARBAŞI, Mehmet
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.04.1985, Kırıkkale
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (506) 769 41 25
 e-mail : mehmetpinarbasi71@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Kırıkkale Üni./Endüstri Müh. Bölümü	2010
Lisans	Kırıkkale Üni./Endüstri Müh. Bölümü	2008
Lise	Kırıkkale Süleyman Demirel YDA Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-Halen	Hitit Üniversitesi	Arş. Gör.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2015). Variability modeling and balancing of stochastic assembly lines, *International Journal of Production Research*, submitted paper.

Pınarbaşı, M., Alağaç, H. M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2015). Balancing assembly lines with assignment restrictions: Constraint programming approach. *Applied Artificial Intelligence*, submitted paper.

Pınarbaşı, M., Alağaç, H. M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2015). Analysis of bowl effects on stochastic assembly line, *International Journal of Research and Development*, in press.

Pınarbaşı, M., Sel, Ç., Alağaç, H. M. and Yüzükırmızı, M. (2013). Integrated definition

- modeling and Taguchi analysis of flexible manufacturing systems: aircraft industry application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68 (9-12), 2169–2183. doi: 10.1007/s00170-013-4829-9.
- Pınarbaşı, M. ve Yüzükırmızı, M. (2011). Esnek imalat sistemleri için tasarım süreci Modeli ve TAI uygulaması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(4), 937-949.
- Ersöz, S., Pınarbaşı, M., Türker, A. K. ve Yüzükırmızı, M. (2009). Hizmet kalitesinin servqual metodu ile ölçümü ve sonuçların yapısal eşitlik modelleri ile analizi: Öğretmenevi uygulaması. *International Journal of Research and Development*, 1(1), 19-27.
- Pınarbaşı, M., Alağuş, H. M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2014, 14-16 October). *Analysis of bowl effects on assembly line using queueing networks and constraint programming procedure*. Paper presented at the *CIE44 & IMSS'14*, Adile Sultan Palace, Turkey, İstanbul.
- Pınarbaşı, M., Alağuş, H. M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2013, 1-4 July). *Constraint programming based solution procedure for assembly line balancing problem with task assignment restrictions*. Paper presented at the 26th European Conference on Operational Research, Sapienza University of Rome, Italy, Rome.
- Pınarbaşı, M. and Bayram, H. (2013, 11-13 June). *A new TOPSIS and SERVQUAL based method for the measurement of quality in service systems*. Paper presented at the Proceedings of the Fourth International Conference on Mathematical and Computational Applications, Turkey, Manisa.
- Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı, M., Toklu, B. ve Sel Ç. (2012, 24-26 Mayıs). *Genel servis zamanlı kuyruk ağları kullanılarak stokastik tip-2 montaj hattı dengeleme problemlerine kovaryans katsayısının etkisinin araştırılması*. 13. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması ve İstatistik Konferansında sunuldu, Doğu Akdeniz Üniversitesi, KKTC, Fatmagusta.
- Alağuş, H. M., Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı, M. ve Toklu, B. (2014, 25 – 27 Haziran). *Çok modelli montaj hatları dengeleme problemi için bir kısıt programlama modeli*. 34. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresinde (YAEM 2014) sunuldu, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Pınarbaşı, M., Toklu, B. ve Yüzükırmızı, M. (2011, 5-7 July). *Üretim çizelgeleme problemleri için kuyruk ağı yaklaşımı*. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 31. Ulusal Kongresinde (YA/EM 2011) sunuldu, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Pınarbaşı, M., Sel, Ç., Alağuş, H. M. ve Yüzükırmızı, M. (2010, 30 June-2 July). *Improving flexible manufacturing systems performance using taguchi experimental design*. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 30. Ulusal Kongresinde (YA/EM 2010) sunuldu, Sabancı Üniversitesi, İstanbul.
- Sofuoğlu, D., Eğilmez, İ., Hanbaba, Z., Türkmen, Y., Pınarbaşı, M. ve Yüzükırmızı, M. (2010, 30 Haziran-2 Temmuz). *TAI için geleneksel ve modern imalat sistemlerinin karşılaştırmalı performans analizi*. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği

30. Ulusal Kongresinde (YA/EM 2010) sunuldu, Sabancı Üniversitesi, İstanbul.

Pınarbaşı, M. ve Yüzükırmızı, M. (2009, 22-24 Haziran). *QueNET: Esnek imalat sistemleri için üretim performans değerlendirme programı*. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 29. Ulusal Kongresinde (YA/EM 2009) sunuldu, Bilkent Üniversitesi, Ankara.

Pınarbaşı, M., Aktepe, A. ve Yüzükırmızı, M. (2009, 15-17 Ekim). *Çok sınıflı kapalı kuyruk ağları ile esnek imalat sistem performansının iyileştirilmesi*. 9. Üretim Araştırmaları Sempozyumunda sunuldu, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Projeler

Esnek imalat sistemlerinin kuyruk ağı modelleri, 106M367, TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu Genç Kariyer Geliştirme Programı, 2010, Araştırmacı Bursiyer.



GAZİ GELECEKTİR..